This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

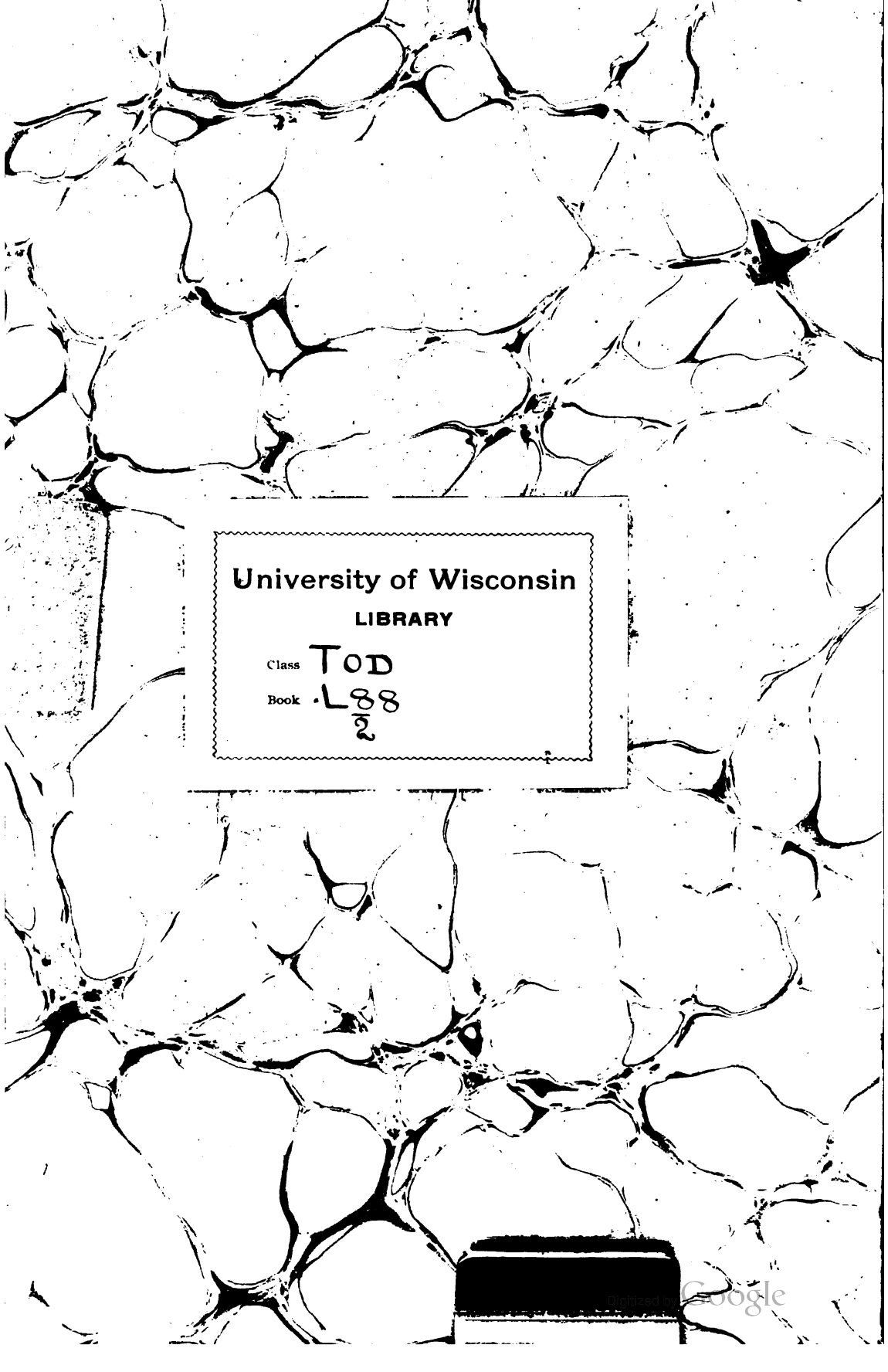
+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`


University of Wisconsin
LIBRARY
Class TOD
Book L88
2
Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

TRAITE THEORIQUE ET PRATIQUE

DES

COURANTS ALTERNATIFS INDUSTRIELS

Digitized by Google

TELEPHONE — **Médaille d'Argent, Exposition Universelle 1889** — TELEPHONE

SPÉCIALITÉ D'APPAREILS DE GRAISSAGE

ROBINETS — MASTIC AU MINIUM

R. HENRY

Seul Constructeur Concessionnaire

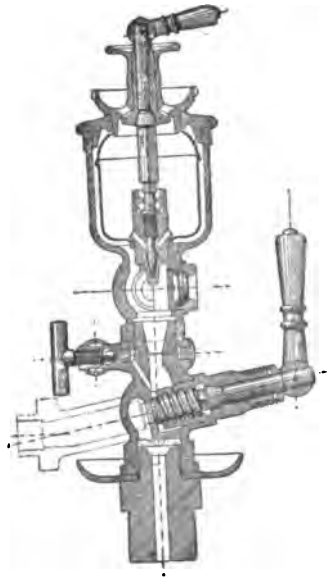
Des marques ci-contre et des brevets J. HOCHGESAND

PARIS. — 117, boulevard de La Villette, 117. — PARIS

Pour Paliers

SYSTÈME
J. HOCHGESAND

Pour tiroirs et cylindres



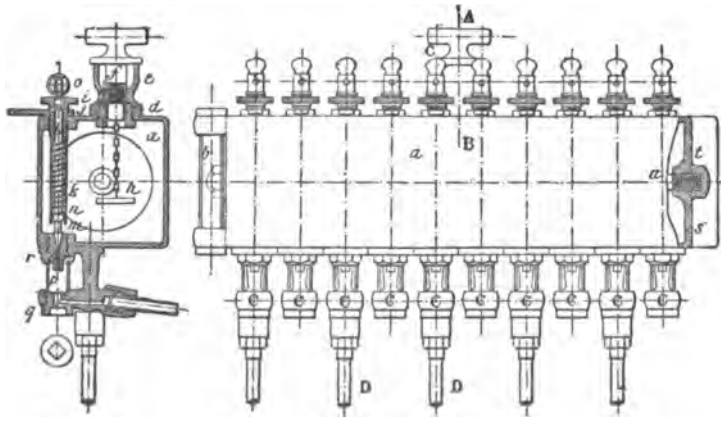
de toutes machines

Pour têtes de bielles

BREV. S.G.D.G.

OLÉOPOLYMÈTRE, système J. HOCHGESAND, Breveté S. G. D. G.

APPAREIL DE GRAISSAGE, à niveau constant et distribution multiple d'huile à débit visible et réglable



Digitized by Google

TRAITÉ THÉORIQUE ET PRATIQUE

DES

COURANTS ALTERNATIFS INDUSTRIELS

PAR

F. LOPPÉ & R. BOUQUET

INGÉNIEURS DES ARTS ET MANUFACTURES

OUVRAGE EN DEUX VOLUMES

DEUXIÈME VOLUME. — PARTIE PRATIQUE

PARIS

E. BERNARD et Cie, IMPRIMEURS-EDITEURS

53ter, Quai des Grands-Augustins, 53ter

1896

Digitized by Google

Digitized by Google

4 2 60
9 Mr 87
6978086
TOD
.L88
2

PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE PREMIER

Les alternateurs.

§ 1er. — DIMENSIONS RELATIVES DES BOBINES ET DES PIÈCES POLAIRES.

Dans le premier volume (page 134), nous avons admis que la f. e. m. d'un alternateur varie suivant la loi des sinus et en avons déduit les formules à appliquer pour trouver les f. e. m., maxima, etc. Nous allons examiner plus en détail la forme de la courbe, pour le cas des alternateurs à disques, en supposant que le flux passe directement d'une pièce polaire à une autre, sans dispersion et que la courbe peut avoir des variations brusques, qui dans la pratique sont atténuées par la s. i.

On a donné à la distance qui sépare les axes de deux champs magnétiques consécutifs (mesurée sur la circonférence dont le plan coïncide avec le plan médian du disque) le nom de *pas*.

La forme de la courbe dépend des largeurs relatives des pièces polaires et des bobines, par rapport au pas.

M. Kapp a étudié la question de la manière suivante :

Supposons, par exemple, que la largeur des pièces polaires soit égale à la moitié du pas (fig. 1, 2, 3), c'est-à-dire que les intervalles qui séparent ces pièces soient égaux à leur largeur.

Si la bobine est formée d'une spire très mince, embrassant un espace dont la section a exactement la même largeur que la pièce polaire, il est facile de voir que la courbe représentative de la f. e. m. a la forme indiquée sur la figure 1.

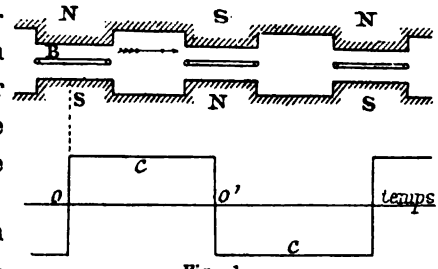


Fig. 1.

Si le cuivre de la bobine a la même largeur que la pièce polaire, sans espace intérieur, on obtiendra la courbe *c* (fig. 2).

Digitized by Google

Si l'espace intérieur a une certaine largeur, ainsi que l'épaisseur du cuivre, de sorte que la bobine embrasse un espace plus grand que la largeur de la pièce polaire, on obtient une courbe *c* (fig. 3).

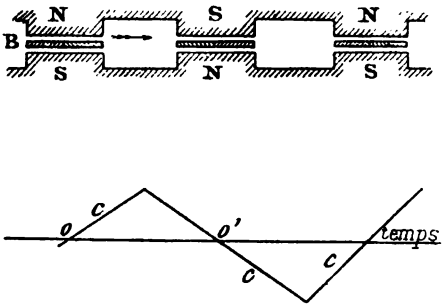


Fig. 2.

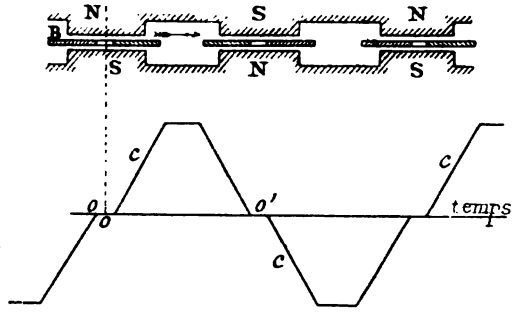


Fig. 3.

On pourra tracer de la même manière les courbes pour un alternateur à anneau.

Si 2M, est le nombre de champs magnétiques, pour le cas d'un alternateur avec champs inversés (fig. 1, 2, 3). $B = s\Phi$ (voir 1er volume, page 134), le flux émanant d'un pôle, m_1 le nombre de bobines induites, n_1 le nombre de spires d'une bobine, N le nombre de tours par minute de l'alternateur, F la fréquence,

$$F = \frac{1}{T}$$

on aura :

$$F = \frac{MN}{60}$$

La variation de flux dans une bobine passant de *o* à *o'*, sera :

$$B - (-B) = 2B.$$

Le temps employé étant $\frac{T}{2}$, la f. e. m. moyenne sera, pour une spire :

$$e_m = \frac{2B}{\frac{T}{2}} = 4\ B\ M\ \frac{N}{60}$$

pour les n_1 spires d'une bobine et pour les m_1 bobines, on aura :

$$e_m = 4\ B\ M\ m_1 n_1 \frac{N}{60} = 4\ B\ M\ n\ \frac{N}{60}$$

Digitized by Google

n étant le nombre total de spires en tension. En exprimant la f.e.m. moyenne en volts, on aura :

$$e_m = 2\,B\,(2\,M)\,n\,\frac{N}{60}\,10^{-8}.$$

Dans le cas d'un alternateur à champs magnétiques non inversés du type Mordey (fig. 4), si p désigne le nombre de paires de pôles ou le nombre de champs, on aura :

$$F = \frac{pN}{60} = \frac{1}{T}$$

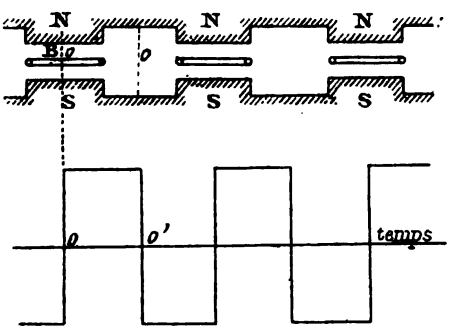


Fig. 4.

La variation de flux dans la bobine entre o et o' sera B, la f. e. m. moyenne sera exprimée par la relation :

$$e_m = \frac{B}{\frac{T}{2}} = \frac{2B}{T} = 2\,B\,p\,\frac{N}{60}$$

La f. e. m. moyenne totale sera exprimée en volts, par la relation :

$$e_m = 2\,B\,p\,n\,\frac{N}{60}\,10^{-8}$$

Les valeurs de la f. e. m. efficace et de la f. e. m. maximum par rapport à la f. e. m. moyenne, dépendent de la forme de la courbe.

Dans tous les cas, on pourra exprimer la f. e. m. efficace par la relation :

$$e_{eff} = K\,B\,(2\,M)\,n\,\frac{N}{60}\,10^{-8}$$

ou :

$$e_{eff} = K\,B\,p\,n\,\frac{N}{60}\,10^{-8}$$

et en général :

$$e_{eff} = K\,A.$$

K étant le double du rapport de la f. e. m. efficace à la f. e. m. moyenne.

Digitized by Google

Dans le cas où la courbe est une sinusoïde, on a :

$$e_{eff} = \frac{e_m}{0{,}90} = 1{,}11\ e_m \qquad e_{max} = 1{,}74\ e_m \qquad K = 2{,}22.$$

Si la courbe a la forme indiquée sur les figures 1 et 4, on a :

$$e_{eff} = e_m = e_{max}. \qquad K = 2.$$

Si la courbe a la forme indiquée sur la figure 2, on a (voir 1er volume, page 273) :

$$e_{eff} = \frac{e_m}{0{,}86} = 1{,}16\ e_m \qquad e_{max} = 2{,}00\ e_m \qquad K = 2{,}32.$$

M. Kapp a dressé le tableau des diverses valeurs de K suivant les dimensions des pièces polaires et des bobines par rapport au pas.

Nos	LARGEUR PAR RAPPORT AU PAS		VALEUR DE K
	des pièces polaires	des bobines	
1	1,00	1,00	1,000
2	1,00	1,00	0,580
3	1,00	0,50	0,817
4	0,62	0,50	2,060
5	0,50	1,00	1,635
6	0,50	0,50	2,310
7	0,33	0,33	2,830
8	Sinusoïde.		2,220

Dans le cas d'un alternateur du type Mordey, le pas est la moitié de la distance entre deux pôles adjacents ou entre deux champs consécutifs.

Dans la pratique, la s. i. atténue beaucoup les ressauts brusques des courbes et on peut admettre, sans grande erreur, pourvu que les relations entre les largeurs des pôles et des bobines s'approchent du n° 6 du tableau de M. Kapp, que la courbe est une sinusoïde.

Différentes méthodes sont employées pour obtenir le tracé de la

Digitized by Google

courbe de la f. e. m. d'un alternateur existant, nous les étudierons au chapitre VIII.

Quand on place deux fois plus de bobines que de champs, celles-ci occupant tout l'espace sur l'armature ont comme largeur la moitié du pas. M. Elihu Thomson a trouvé qu'il y a avantage, quand on a juste autant de bobines que de champs, à donner à l'ouverture intérieure des bobines un peu moins de la largeur de la pièce polaire, de sorte que la largeur totale dépasse la moitié du pas et que même l'on peut arriver à juxtaposer encore les bobines.

Dans certains cas, l'induit au lieu d'être muni de bobines, peut être muni de barres, c'est-à-dire d'un enroulement en tambour; cette disposition est particulièrement employée pour les alternateurs polyphasés à bas potentiel.

Dans ce cas, les pôles disposés, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de l'induit, doivent produire des champs magnétiques inversés.

La figure 5 donne le schéma d'une machine à quatre pôles et le mode de connexions entre les barres.

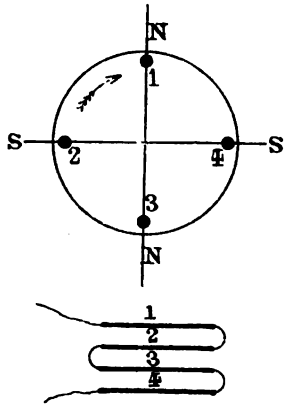


Fig. 5.

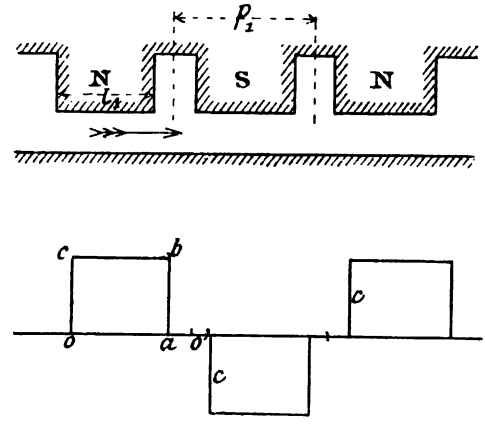


Fig. 6.

La figure 6 montre les variations de la f. e. m.

Si B est le nombre total de lignes de force émanant d'un pôle, F la fréquence, N le nombre de tours, p le nombre de *paires* de pôles, on a :

$$F = \frac{1}{T} = \frac{p\,N}{60}$$

Digitized by Google

$$e'_m = \frac{B}{\frac{T}{2}} = 2\,B\ p\,\frac{N}{60}$$

Il est facile de voir que la f. e. m. efficace est égale à la f. e. m. moyenne et on a :

$$e'_{eff} = 2\,B\,p\,\frac{N}{60}$$

Comme il y a $2p$ barres, la f. e. m. totale exprimée en volts sera :

$$e_{eff} = 4\,B\,p^2\,\frac{N}{60}\ 10^{-8}$$

La f. e. m. maximum sera :

$$e_{max} = \frac{p_1}{l_1}\ e_m$$

On pourra du reste placer plusieurs barres les unes à côté des autres ou au-dessous les unes des autres et il est facile de voir que l'ensemble des barres accolées pourra arriver à remplir l'espace cor-

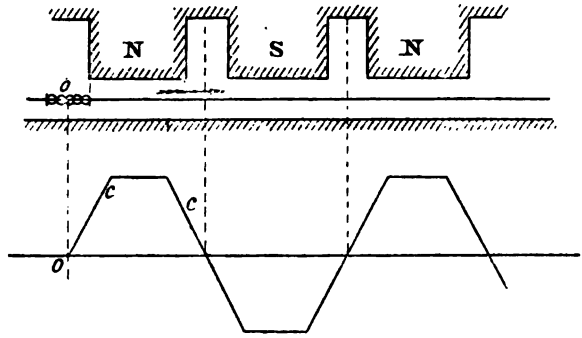


Fig. 7.

respondant au vide entre deux pôles. Si cette dernière condition est remplie, la courbe de la f. e. m. sera celle représentée sur la figure 7. Si b est le nombre de barres en série, on aura :

$$e'_m = \frac{b\,B}{\frac{T}{2}} = 2\ B\ b\ p\ \frac{N}{60}$$

Le rapport de la f. e. m. efficace à la f. e. m. moyenne se déduira

Digitized by Google

de la forme de la courbe; si K est le double de ce rapport, il est facile de voir que la f. e. m. efficace totale sera exprimée par la relation :

$$e_{eff} = 2\ K\ B\ b\ p^2\ \frac{N}{60}\ 10^{-8}\ (^1)$$

Les barres d'une même série seront montées en tension, comme l'indiquent les schémas des figures 8 et 9 ou comme l'indique le schéma de la figure 10.

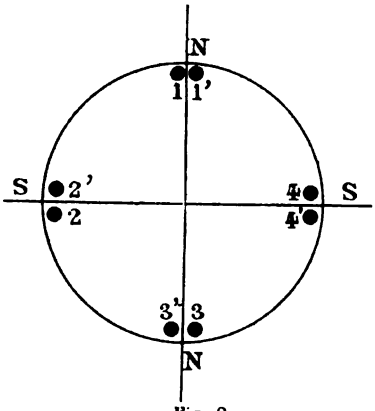


Fig. 8.

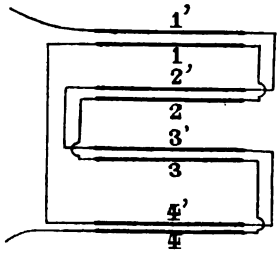


Fig. 9

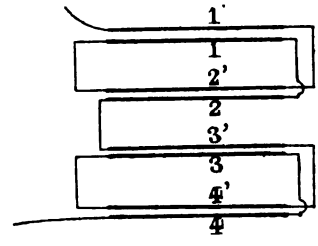


Fig. 10.

Le calcul de la valeur de K peut être fait sans intégrer, on partagera la courbe au moyen d'ordonnées, en un certain nombre de parties égales et on mesurera l'ordonnée moyenne de chaque partie. On divisera ensuite la somme des carrés de ces ordonnées moyennes par leur somme, et on aura ainsi $\frac{K}{2}$.

1. Cette relation est du reste identique à celle trouvée pour les alternateurs à champs alternés avec bobines ; on a dans ce dernier cas :

$$e_{eff} = K\ B\ (2\ M)\ p\ n\ \frac{N}{60}\ 10^{-8}$$

$$2\ M = 2\ p.$$

n nombre total de spires, est le produit du nombre des bobines induites $2\ p$, par n_1 nombre de spires d'une bobine.

$$n = 2\ p\ n_1.$$

Mais n_1 est le double du nombre de fils actifs d'une bobine.

$$2\ n_1 = b.$$

on a donc :

$$n = p\ b.$$

En remplaçant $2\ M$ et n par leurs valeurs en fonction de p et de b ; on voit bien que l'on retrouve la relation pour les alternateurs à barres.

Digitized by Google

Les barres sont ordinairement noyées dans les tôles de l'induit, dont elles sont isolées au moyen de tubes d'amiante ou de mica.

Dans ce cas, les barres ne coupent pas les lignes de force, celles-ci, si l'on peut s'exprimer ainsi, glissent autour d'elles, de sorte qu'il n'y a pas de courants de Foucault induits dans ces barres auxquelles on peut donner une forte section. La disposition a en outre l'avantage d'assurer une grande solidité à l'enroulement et de permettre de réduire considérablement la longueur de l'espace d'air que doivent franchir les lignes de force, espace que l'on peut désigner sous le nom d'*entrefer*.

Dans le cas où les barres sont placées dans des trous (fig. 11), il faut percer ces derniers le plus près possible de la surface, afin d'éviter la dispersion des lignes de force, venant se fermer directement, sans concourir à l'induction.

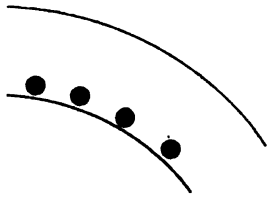


Fig. 11.

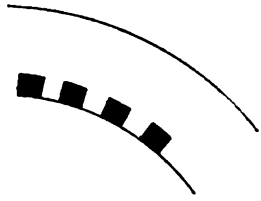


Fig. 12.

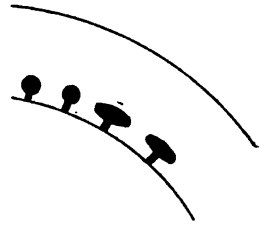


Fig. 13.

On peut également placer les barres dans des rainures de section rectangulaire, et avoir ainsi un induit denté (fig. 12), ou bien donner aux rainures les formes indiquées sur la figure 13, suivant que l'on veut placer une ou plusieurs barres dans une même rainure.

§ 2. — INFLUENCE DE LA SELF INDUCTION

Comme nous l'avons vu dans le premier volume, la s. i. a pour effet de décaler le courant par rapport à la f. e. m. appliquée ou induite, de sorte que la résistance apparente est augmentée.

La puissance est alors $E_{eff}\ I_{eff} \cos \varphi$, au lieu de $E_{eff}\ I_{eff}$ dans le cas où il n'y a pas s. i. (On désigne ordinairement le premier produit par le nom de *watts vrais* et le deuxième produit $E_{eff}\ I_{eff}$ par le nom de

Digitized by Google

watts apparents ; dans le cas où il n'y a ni s. i., ni capacité, les watts vrais sont égaux aux watts apparents).

Pour transporter la même puissance, quand il y a de la s. i. dans le circuit, que quand le circuit est non inductif, il faut ou augmenter E_{eff}, c'est-à-dire augmenter l'excitation, etc., ou augmenter I_{eff}, ce qui augmente les pertes sur la ligne.

La s. i. (tant de l'armature que du circuit extérieur) a donc une influence fâcheuse au point de vue du transport de l'énergie et l'on doit tâcher d'en annuler l'effet en employant des dispositions convenables, comme nous le verrons (emploi de condensateurs ou de moteurs monophasés synchrones, chapitre II). Il y a cependant avantage à avoir un peu de s. i. dans l'armature, on peut s'en rendre compte de la manière suivante, en employant le procédé graphique de représentation de M. Blackeslay (1er volume, page 107).

OE (fig. 14) représente la f. e. m. appliquée ou induite, on a :

$$OE = m E_a$$

BE représente la f. e. m. due à la s. i. de l'armature :

$$BE = m k L_a I$$

BC représente la f. e. m. perdue par suite de la résistance r de l'armature, on a :

$$BC = m r I$$

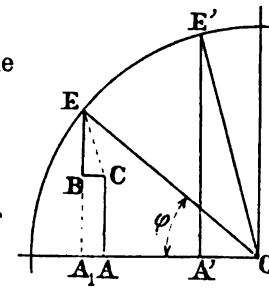


Fig. 14.

AC représente la f. e. m. due à la s. i. du circuit extérieur et OA représente la f. e. m. aux bornes de l'alternateur.

Si l'alternateur est mis en court circuit, la f. e. m. appliquée ne variant pas (elle diminue alors légèrement par suite de la réaction d'armature, comme nous le verrons plus loin), on peut trouver la valeur de l'intensité efficace du courant par la construction suivante :

On mène par O, la ligne OE' parallèle à CE, OE' représente la f. e. m. appliquée, E'A' la f. e. m. due à la s. i. de l'armature, OA' la f. e. m. perdue par suite de la résistance d'armature.

(1) *Electric transmission of energy.*

Digitized by Google

L'intensité maximum I_c du courant quand l'alternateur est en court circuit, sera donnée par la relation :

$$E' A' = mk\ L_a\ I_c$$

$$I_c = \frac{E' A'}{mk\ L_a}$$

$$I_c = I\ \frac{E'A'}{E\ B}$$

Si la s. i. L_a de l'armature est suffisamment grande, l'intensité efficace du courant, lors d'un court circuit, pourra ne pas être dangereuse.

Un alternateur fournissant le courant à un moteur peut être mis en court circuit quand le moteur s'arrête; il y a donc avantage à avoir dans ce cas de la s. i. dans l'armature.

Il est bien difficile de déterminer la s. i. d'un alternateur, qui d'une part n'est pas trop nuisible au transport de la puissance et d'autre part empêche l'intensité du courant d'atteindre une valeur dangegereuse, lors d'un court circuit.

M. Kapp à la suite d'essais sur les alternateurs provenant des meilleurs constructeurs, a trouvé que la f. e. m. de s. i. ne doit pas être inférieure à 20 %, et supérieure à 40 % de la f. e. m. aux bornes (c'est-à-dire 0,40 AO > BE > 0,20 AO).

La s. i. dans une armature donnée, varie avec l'excitation, car la résistance magnétique varie suivant l'induction magnétique dans le fer.

Le professeur Ayrton a trouvé que la s. i. d'un alternateur Mordey, était de 0,036 à 0,038 quadrant, quand ce dernier n'était pas excité et baissait de 14 % quand le champ était excité.

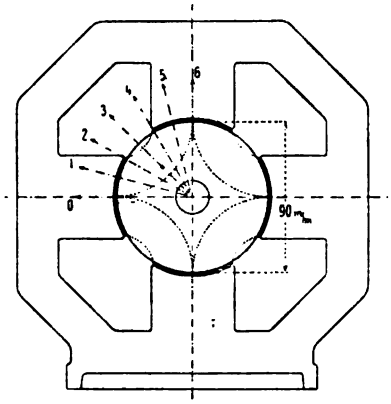


Fig. 15.

Le coefficient de s. i. est du reste variable, suivant les positions relatives de l'armature et des pôles.

A l'École supérieure technique de Gratz (1), on a procédé à des essais sur un petit alternateur, dont le schéma est représenté sur la figure 15. Les constantes de ce dernier étaient :

1. *Elektrotechnische Zeitschfrit* du 16 juin 1893.

Digitized by Google

Puissance normale.	100 volts, 4 ampères.
Nombre de pôles	4
Fréquence	100
Vitesse de l'enroulement	14 c. m. à la seconde.
Induction dans l'entrefer. . . .	5000 unités C. G. S.
Longueur du fil utile sur l'armature.	22 mètres.
Résistance de l'armature	1,6 ohm.

En mesurant les coefficients de s. i. pour les positions 0, 1, 2, 3.... 6, d'après la méthode de Maxwell, on a trouvé les valeurs suivantes :

Position de l'armature	Coef. de *s. i.*	Position de l'armature	Coef. de *s. i.*
0	$52{,}7 \times 10^5$ c. m.	4	$47{,}1 \times 10^5$ c. m.
1	$51{,}2 \times 10^5$	5	$50{,}9 \times 10^5$
2	$47{,}1 \times 10^5$	6	$52{,}7 \times 10^5$
3	$44{,}9 \times 10^5$		

La valeur moyenne est :

$$L_d = 48{,}8 \times 10^5 \text{ c. m.} = 0{,}00488 \text{ quadrant.}$$

Les diverses valeurs peuvent s'exprimer par la relation suivante :

$$L_m = 10^5 (48{,}8 + 3{,}9 \cos 4\ \alpha^\circ) \text{ c. m.}$$

pour laquelle α° représente l'angle de l'armature, qui est *o* pour la position *o*.

Les variations sont donc de 8 % au-dessus et au-dessous de la valeur moyenne. Ces variations doivent avoir pour conséquence une déformation des courbes de la f. e. m. et du courant, et le décalage entre la tension et le courant varie à chaque instant.

Influence de la fréquence.

Comparons, par exemple, deux alternateurs A et B du même type, ayant même puissance, même voltage, et même nombre de tours et supposons que le courant fourni par A, a une fréquence double de celui fourni par B.

Digitized by Google

Si l'alternateur A, a une fréquence F, pour un nombre de tours N, on aura :

$$F = \frac{1}{T} = \frac{M_1 N}{60}$$

$$M_1 = \frac{60 F}{N}$$

$2 M_1$ étant le nombre de champs.

Pour l'alternateur B, la fréquence sera $\frac{F}{2}$, le nombre de pôles $2M_2$ sera donné par la relation :

$$\frac{F}{2} = \frac{M_2 N}{60}$$

$$M_2 = \frac{30 F}{60} = \frac{M_1}{2}.$$

B aura deux fois moins de champs magnétiques et deux fois moins de bobines induites que A.

La f. e. m. efficace devant être la même, on aura :

$$\text{Pour A :} \qquad e_{eff} = K S_1 \Phi_1 (2 M_1) m_1 n_1 \frac{N}{60} 10^{-8}$$

$$\text{Ponr B :} \qquad e_{eff} = K S_2 \Phi_2 (2 M_2) m_2 n_2 \frac{N}{60} 10^{-8}.$$

d'où :

$$S_1 \Phi_1 (2 M_1) m_1 n_1 = S_2 \Phi_2 (2 M_2) m_2 n_2.$$

On a :

$$M_1 = 2 M_2. \qquad \text{et} \qquad m_1 = 2 m_2.$$

m_1 et m_2 étant les nombres de bobines des induits, d'où :

$$4 S_1 \Phi_1 n_1 = S_2 \Phi_2 n_2$$

Si on prend Φ_1 égal à Φ_2, on aura :

$$4 S_1 n_1 = S_2 n_2$$

Si, pour satisfaire à cette relation, on fait $n_2 = 4n_1$ c'est-à-dire si l'on place sur une bobine induite de B quatre fois plus de spires que sur une bobine de A, la s. i. y sera quatre fois plus forte ; il en sera de même si l'on fait $S_2 = 4S_1$.

Digitized by Google

La s. i. d'une bobine de B sera donc quatre fois plus forte que celle d'une bobine de A, et comme B a deux fois moins de bobines que A, son coefficient de s. i. sera deux fois plus grand.

Si l'on fait la section des pièces polaires quatre fois plus forte, en conservant le même nombre de spires par bobine, le pas devra être doublé : les dimensions extérieures des alternateurs seront les mêmes. Le fil enroulé sur une bobine de B aura une longueur double de celui enroulé sur une bobine de A, et, comme les longueurs des fils de liaison seront doubles, on aura exactement la même longueur de fil sur les deux armatures, de sorte que les résistances seront les mêmes. Il en sera de même pour l'inducteur, et la dépense d'excitateur sera la même pour B que pour A.

Si l'on adopte les mêmes sections pour les pièces polaires, on double le nombre de spires d'une bobine ; le pas sera le même que pour A, et les dimensions extérieures de B seront moitié de celles de A.

La résistance du fil de l'armature sera à peu de chose la même que pour A (les longueurs de fils de liaison des bobines seront moitié moindres ; mais par contre les fils des bobines seront un peu plus longs), tandis que la longueur et la résistance du fil de l'inducteur seront moitié moindres; on aura donc moitié moins de dépense pour l'excitation. (Voir plus loin la *Réaction d'armature*).

Si les alternateurs travaillent tous les deux sur un circuit sans s. i, les décalages seront les mêmes.

L'angle de décalage pour l'alternateur A sera donné par la relation :

$$\text{tg.}\,\varphi_1 = \frac{k_1 L_1}{R} \qquad \left(k_1 = \frac{2\pi M_1 N}{60}\right)$$

Celui pour l'alternateur B :

$$\text{tg.}\,\varphi_2 = \frac{k_2 L_2}{R} \qquad L_2 = L_1$$

$$k_2 = \frac{2\pi M_2 N}{60} = \frac{k_1}{2}$$

On aura donc :

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

Quand l'alternateur est mis en court circuit, l'intensité efficace du courant sera (1er volume, page 32) pour A :

Digitized by Google

$$I_{eff} = \frac{E_a}{\sqrt{2}\ \sqrt{R_1^2 + k_1^2 L_1^2}}$$

pour B, on a :

$$R_2 = R_1 \qquad L_2 = 2 L_1 \qquad k_2 = \frac{k_1}{2}.$$

$$I_{eff} = \frac{E_a}{\sqrt{2}\ \sqrt{R_1^2 + k_1^2 L_1^2}},$$

l'intensité efficace en court circuit sera la même que pour l'alternateur A.

Le prix de revient de l'alternateur à basse fréquence, d'après les considérations précédentes, sera un peu moindre que le prix de revient de l'alternateur à haute fréquence, mais la différence ne sera pas aussi grande qu'on pourrait le croire au premier abord. Dans tous les cas, l'alternateur à basse fréquence donnera moins de décalage, car en pratique, on pourra augmenter l'intensité magnétique du champ inducteur (en prenant $\Phi_2 > \Phi_1$), car les pertes par hystérésis y sont moindres.

§ 3. — RÉACTION D'INDUIT.

Les considérations suivantes montrent bien que la réaction d'induit, dépend de la s. i. du circuit (armature et circuit extérieur).

Supposons que l'induit d'un alternateur à disque se déplace dans le sens de la flèche F (fig. 16), les flèches 1, 2, 3, etc., indiquant les directions des flux inducteurs.

De A à B, le flux inducteur diminue, le flux induit d'après la loi de Lenz doit être de même sens, c'est-à-dire dirigé suivant la flèche 1. Il est facile de voir que de B à C, le flux induit aura encore la même direction, tandis qu'entre C et E il sera de sens opposé.

Si le circuit de l'induit est dépourvu de s. i. l'intensité du courant pour chaque position de la bobine pourra être représentée par la sinusoïde *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, concordant avec la courbe de la f. e. m. appliquée. Il est facile de voir que la direction du flux induit est donnée par l'ordonnée allant d'un point de la courbe à l'axe des abscisses *ae*.

Quand la bobine (sans s. i.) se déplace de A à B et de C à D, les

Digitized by Google

flux inducteur et induit sont de même sens, tandis que quand elle se déplace de B à C et de D à E, les flux sont de sens contraires. Comme les longueurs AB, BC, CD et DE sont égales, au total, la réaction de l'armature est nulle.

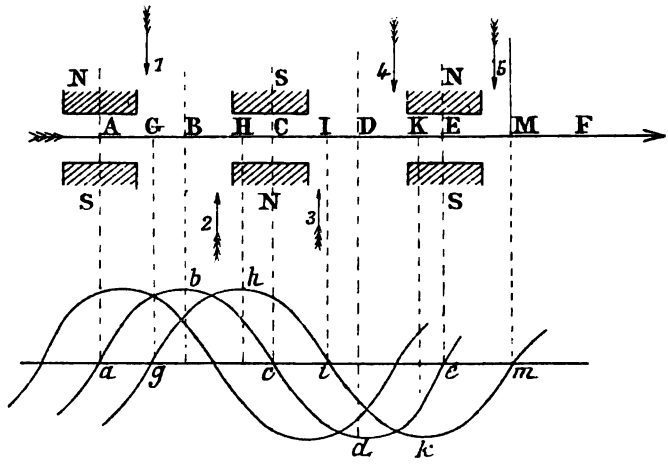


Fig. 16

Si le circuit induit a de la s. i., le courant est décalé en arrière par rapport à la f. e. m. appliquée, et son intensité pour chaque position de la bobine, pourra par exemple être représentée par la courbe *g*, *h*, *i*, *k*, *m*. Il est facile de voir que de A à G, de B à I et de D à M le flux induit est opposé au flux inducteur, tandis que de G à B et de I à D les deux flux sont de même sens. Comme on a :

$$AG + BI + DM > GB + ID$$

l'action démagnétisante l'emporte.

Si le décalage en arrière pouvait atteindre 90° (pour $L = \infty$), les deux flux seraient constamment opposés et l'action démagnétisante serait maximum.

En intercalant au contraire un condensateur ou un appareil provoquant une avance de phase, on peut obtenir un décalage en avant et réduire ainsi l'excitation puisque, comme il est facile de le voir, la réaction d'armature s'y ajoute. Dans les alternateurs avec induit contenant du fer, le flux inducteur est soumis à une autre sorte de variation, provenant des différences de perméabilité magné-

Digitized by Google

tique, la résistance diminuant chaque fois qu'une bobine avec noyau de fer passe devant un pôle. Le courant d'excitation, provenant d'une dynamo auxiliaire à courant continu est alors fortement ondulé.

Calcul de la réaction d'armature (1).

La question est très complexe, cependant il est clair que l'effet est proportionnel à l'intensité efficace du courant de l'armature. Comme nous venons de le voir, une augmentation de décalage fait croître l'effet démagnétisant, mais à première vue, il n'est pas possible de se rendre compte si cet effet est simplement proportionnel à l'angle de décalage.

Les formes des bobines et des pièces polaires, ainsi que l'allure de la courbe représentative du courant doivent naturellement avoir une certaine influence. L'effet n'est du reste pas constant, c'est une fonction périodique du temps; mais cependant comme le circuit d'excitation a nécessairement une grande s. i., on peut sans commettre une grande erreur, admettre l'effet comme pratiquement constant. L'effet démagnétisant ou comme on l'appelle en Angleterre *les ampères-tours arrière*, c'est-à-dire le nombre d'ampères-tours supplémentaires dont il faut munir l'inducteur pour annuler la réaction d'armature peut donc être déterminé en intégrant l'effet instantané pour une période complète. Si X représente les ampères-tours annulés, à un instant donné, l'excitation en ampères-tours à ajouter au champ, sera

$$\int_0^T X \, dt$$

Il faut remarquer que X est le produit de la valeur de l'intensité à l'instant donné par le nombre de spires occupant à cet instant une position telle que le courant exerce un effet démagnétisant. La solution de l'intégrale est souvent compliquée, sinon impossible. Mais dans le cas simple où la largeur des pôles et des bobines est égale à la moitié du pas, ce qui correspond plus ou moins aux données des alternateurs que l'on construit actuellement, on peut trouver une solution approximative.

1. *Dynamos, alternators and transformers*, par G. Kapp.

Digitized by Google

Si φ est l'angle de décalage et n le nombre total des spires d'une bobine, on a :

$$X = \frac{ni}{\pi}\left(\frac{\pi}{2} - \varphi - \alpha\right) \sin \alpha$$

En développant sin α en série exponentielle et en intégrant pour une période, on trouve la relation :

$$X_b = n\ I\ \sqrt{2}\ \frac{2\varphi}{\pi}$$

I étant l'intensité efficace du courant ; ou bien en exprimant φ en degrés :

$$X_b = 0{,}0156\ n\ I\ \varphi^o$$

X_b étant le nombre d'ampères-tours à ajouter (ou à retrancher dans le cas où le courant est décalé en avance) pour une bobine et par conséquent pour toute l'armature.

Cette formule est simplement une approximation et donne une valeur un peu trop forte pour les ampères-tours additionnels, mais l'erreur est très faible et en pratique la formule peut très bien être appliquée.

Par exemple, pour une machine de 100 k. w. l'intensité efficace étant de 50 a., le nombre de spires d'une bobine de l'armature 80 et l'angle de décalage en arrière 20°, on aura :

$$X_b = 0{,}0156 \times 80 \times 50 \times 20 = 1248$$

Il faudra donc ajouter à l'excitation, pour vaincre la réaction d'induit 1248 ampères-tours.

Nous avons vu page 10 qu'en admettant que la f. e. m. induite reste constante, si la s. i. de l'armature d'un alternateur a une valeur assez forte, cet alternateur peut être mis sans danger en court circuit.

Comme dans le cas d'un court circuit, le décalage est considérable (on a $\operatorname{tg} \varphi = \frac{kL}{r}$, et r résistance de l'armature est très faible), la réaction d'armature est très forte, ce qui diminue l'intensité du champ inducteur, et par conséquent la f. e. m. induite et concourt encore à diminuer l'intensité efficace du courant lors du court circuit.

Digitized by Google

En considérant au point de vue de la réaction d'induit les alternateurs A et B (page 11), on a vu que si B a un pas double de A, la dépense d'excitation est la même. L'augmentation d'ampères-tours pour vaincre la réaction d'induit sera la même, puisque les bobines induites ont le même nombre de spires.

Si B a le même pas que A, la dépense d'excitation est moitié moindre que pour A, mais par contre l'augmentation d'ampères-tours pour vaincre la réation d'induit sera double, puisque les bobines induites ont un nombre double de spires. Dans ce dernier cas, le courant lors d'un court circuit aura une intensité efficace moindre que celui de A.

Quand la réaction d'armature a une certaine valeur, l'alternateur peut être autorégulateur pour courant constant, en gardant l'excitation constante. En effet, à mesure que la résistance totale R du circuit diminue, $\text{tang } \varphi = \frac{k\,L}{R}$ augmente, ainsi que la réaction d'armature, de sorte que la f. e. m. induite diminue.

§ 4. — DÉTERMINATION DU RENDEMENT

Quand on dispose d'un moteur assez puissant, le rendement se détermine au moyen du frein, d'un wattmètre, d'ampèremètres et de voltmètres.

M. Mordey, dans la séance de l' « Institution of electrical Engineers » de Londres, du 23 février 1893, a indiqué une méthode pour le cas où le moteur dont on dispose n'a pas la puissance nécessaire. « Pour déterminer les pertes mécaniques et électriques quand on ne dispose pas de la puissance nécessaire correspondant à la pleine charge d'une dynamo, le docteur Hopkinson a le premier indiqué une méthode consistant à relier deux machines, de sorte que l'une agisse comme générateur et l'autre comme moteur, cette dernière venant soutenir la machine motrice.

« Pour des alternateurs à plusieurs bobines, cette méthode peut être modifiée de la manière suivante : le circuit des bobines de l'armature peut être divisé en deux parties, que l'on relie en sens contraire, ces deux parties développent des f. e. m. inégales, de sorte qu'une partie, la plus forte serve de génératrice, la plus faible agis-

Digitized by Google

sant comme moteur. On peut obtenir cela en divisant l'ensemble des bobines en deux parties inégales (fig. 17). On mesure le courant au moyen d'un ampèremètre, et la f. e. m. au moyen d'un voltmètre intercalé aux extrémités des portions du circuit. Quand l'excitation, la vitesse et l'intensité efficace correspondent à la marche en génératrice à pleine charge, les pertes mécaniques et électriques sont les mêmes.

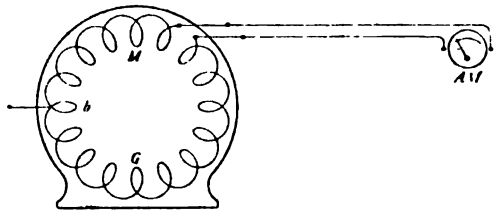


Fig. 17.

« Lors de l'essai d'un alternateur de 250 k. w., on obtint les résultats suivants : L'intensité efficace était de 60,25 a., la tension à l'endroit de la liaison de 1656 v., correspondant donc à une charge de $2 \times 60{,}25 \times 1656 = 199{,}5$ k. w.

« L'excès de puissance motrice, mesuré à l'indicateur au-dessus de la marche à vide, était de 6,37 k. w. La perte par courant tourbillonnaire 3 k. w., il restait donc 3,37 k. w. La perte calculée $i^2 r$ ($r = 0{,}23$ ohm) était 3,63. l'excitation 1,365 k. w., le rendement commercial, c'est-à-dire, charge divisée par charge plus pertes était donc :

$$\frac{199{,}5}{199{,}5 + 10{,}735} = 0{,}95.$$

« Afin d'être indépendant des mesures mécaniques, on peut disposer les choses comme l'indique la figure 18. A est un alternateur

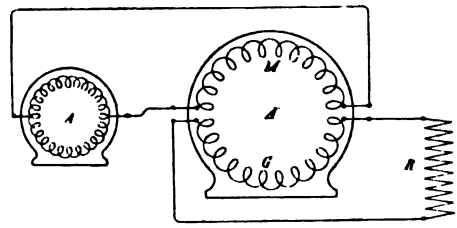


Fig. 18.

commandé par un moteur, A' l'alternateur dont on veut déterminer

Digitized by Google

le rendement, agissant pour la partie M comme moteur et pour la partie G comme générateur travaillant sur une résistance R.

« Au lieu de faire travailler l'alternateur sur une résistance R, on peut le faire agir pour aider A, comme l'indique la figure 19, dans laquelle la partie *c* sert à la traction. Ces dispositions (fig. 18 et 19) ne se différentient de la première (fig. 17) qu'en ce que l'énergie nécessaire pour vaincre les pertes est fournie électriquement au lieu de mécaniquement. »

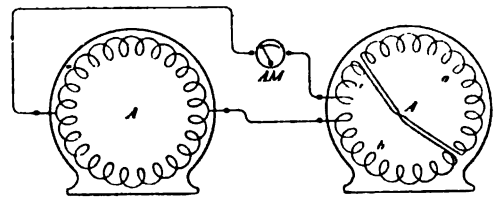


Fig. 19.

Cette méthode est simple et donne de bons résultats, il n'y a qu'une objection, peu importante du reste en pratique, c'est que les pertes mécaniques ne sont pas calculées très exactement, car celles-ci sont certainement différentes quand on fait marcher une machine comme moteur générateur au lieu de la commander par un moteur, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une courroie.

§ 5. — COURBES CARACTÉRISTIQUES

On peut tracer pour un alternateur, diverses *courbes caractéristiques*, que l'on peut classer de la manière suivante :

Courbe de puissance. — Les abscisses sont proportionnelles à l'intensité efficace et les ordonnées à la puissance.

L'excitation et la vitesse étant constantes, on fait varier la résistance du circuit extérieur (sans s. i.).

Courbe d'intensité. — Les abscisses sont proportionnelles à la vitesse de l'alternateur (ou à *k* vitesse angulaire ou pulsation du courant) et les ordonnées à l'intensité efficace. L'excitation, ainsi que la résistance du circuit extérieur sont maintenues constantes.

Courbe de la f.e.m. efficace aux bornes en fonction de l'intensité

Digitized by Google

efficace du courant. —On fait varier la résistance extérieure (sans s.i.), l'excitation et la vitesse restant constantes.

Courbe de f. e. m. efficace aux bornes, en fonction de l'intensité du courant d'excitation. — Ces courbes, à vitesse constante sont tracées : 1° à circuit ouvert et 2° pour diverses valeurs de l'intensité efficace du courant (en faisant varier la résistance extérieure, sans s.i.).

Courbes de puissance. — En maintenant la vitesse de l'alternateur constante, on fait varier la résistance du circuit extérieur, en formant celui-ci de deux conducteurs jointifs parcourus en sens inverse par le courant, ce qui pratiquement annule la s.i. On mesure chaque fois le travail que l'on porte en ordonnée, et l'intensité efficace que l'on porte en abscisse.

En admettant que la réaction d'armature soit négligeable, c'est-à-dire que E_a est constant (pour une vitesse donnée), on peut trouver l'équation de la courbe de la manière suivante :

On a :

$$e_a = E_a \sin kt.$$

$$i = \frac{E_a}{\sqrt{R^2 + k^2 L^2}} \sin (kt - \varphi)$$

$$e_a i = \frac{E_a^2}{\sqrt{R^2 + k^2 L^2}} \sin kt \sin (kt - \varphi)$$

$$y = (e_a i)_{moy} = \frac{E_a^2 R}{2 (R^2 + k^2 L^2)} \quad (1^{er} \text{ volume, page 32.})$$

$$x = i_{eff} = \frac{E_a}{\sqrt{2 (R^2 + k^2 L^2)}}$$

Comme le circuit extérieur est dépourvu de s.i. (c'est-à-dire que L reste constant) et k est constant, il suffit pour obtenir l'équation de la courbe, d'éliminer R entre les deux relations ci-dessus, on a :

$$R^2 + k^2 L^2 = \frac{E_a^2}{2 x^2}$$

$$y^2 = \frac{E_a^4 \left(\frac{E_a^2}{2 x^4} - k^2 L^2\right)}{4 \frac{E_a^4}{4 x^4}} = \frac{E_a^2}{2} x^2 - k^2 L^2 x^4$$

Digitized by Google

Courbe du quatrième degré, qui dans la portion utile (celle pour laquelle x et y sont positifs) à la forme indiquée sur la figure 20.

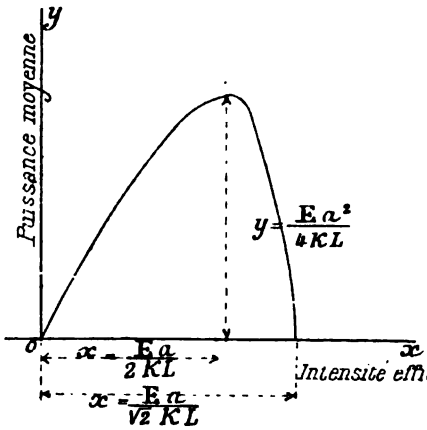


Fig. 20.

Pour $x = o$ et $x = \frac{E_a}{\sqrt{2}\ k\,L}$

on a : $y = o$.

Pour $x = \frac{E_a}{2\,k\,L}$

$y = \frac{E_a^2}{4\,k\,L}$ (maximum).

M. F. Lucas, a en 1884, lorsqu'il était chargé comme Ingénieur en chef du service des phares, tracé la courbe de puissance d'une machine magnéto-électrique de Méritens, en mesurant le travail au moyen d'un frein de Prony et en retranchant chaque fois de ce travail, la valeur constante correspondant à la marche à circuit ouvert. Les résultats obtenus ont pu être convenablement représentés par la relation empirique :

$$y = (107 - 1{,}21\ x)\ x$$

La courbe de puissance était donc une parabole à axe vertical. Sa forme s'éloigne de celle de la courbe théorique du quatrième degré, par le fait de la réaction d'armature.

Courbes d'intensité. — On maintient la résistance et l'excitation constantes, on fait varier la vitesse que l'on porte en abscisse et on mesure chaque fois l'intensité efficace du courant que l'on porte en ordonnée.

On a :

$$y = I_{eff} = \frac{E_a}{\sqrt{2}\ \sqrt{R^2 + k^2 L^2}}$$ (1er volume, page 32).

E_a, si on néglige la réaction d'armature, est proportionnel à la vitesse ou à k (1er volume page 135) que l'on prend pour abscisse, on aura donc :

$$y = A\,k = Ax.$$

Digitized by Google

A étant une constante.

$$y = \frac{Ax}{\sqrt{2}\ \sqrt{R^2 + L^2 x^2}}$$

$$y^2 = \frac{A^2 x^2}{2(R^2 + L^2 x^2)} = \frac{A^2}{2L^2 + 2\frac{R^2}{x^2}}$$

La courbe théorique est du quatrième degré, ayant comme asymptote la droite :

$$y = \frac{A}{L\sqrt{2}}$$ (Figure 21).

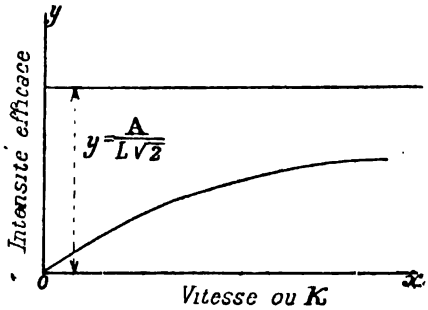


Fig. 21

Cette courbe caractéristique est très peu employée, car ordinairement un alternateur est construit pour une vitesse angulaire ou pulsation donnée, du courant qu'il doit fournir.

Courbe de la f. e.m. efficace aux bornes, en fonction de l'intensité efficace du courant. — Pour déterminer les éléments de cette courbe, on fait varier la résistance R', sans s.i., du circuit extérieur, on porte en abscisse la valeur de l'intensité efficace et en ordonnée la valeur de la différence de potentiel efficace aux bornes.

Si on néglige la réaction d'armature, on a E_a constant. Si R est la résistance totale du circuit, et r est la résistance de l'armature, on a :

$$R = r + R'$$

On aura :

$$e_a = E_a \sin kt.$$

$$x = I_{eff} = \frac{E_a}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R^2 + k^2 L^2}}$$ (1er volume, page 32).

Si la valeur instantanée de la f. e. m. effective e_e, est :

$$e_e = E_a \cos\varphi \sin(kt - \varphi)$$ (1er volume, page 32)

la valeur instantanée de la f.e.m. effective aux bornes e_b, sera :

$$e_b = e_e - ri = \frac{E_a}{R} \cos\varphi \sin(kt - \varphi)(R - r)$$

Digitized by Google

On aura donc :

$$(e_b)_{eff} = \frac{2}{\pi}\frac{R - r}{R} E_a \cos^2 \varphi \qquad (1^{er} \text{ volume, page 19}).$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + k^2 L^2}} \qquad (1^{er} \text{ volume, page 31}).$$

$$y = (e_b)_{eff} = \frac{2R(R - r)}{\pi (R^2 + k^2 L^2)} E_a.$$

En éliminant R entre les deux relations donnant x et y, on aura l'équation de la courbe, qui est une ellipse.

Courbes de la variation de la f.e.m. efficace aux bornes, en fonction de l'intensité du courant d'excitation.

On porte en abscisse l'intensité du courant et en ordonnée la f. e.m. efficace aux bornes.

La courbe tracée à circuit ouvert est théoriquement une ligne droite, pratiquement c'est une courbe qui a la forme de A (fig. 22).

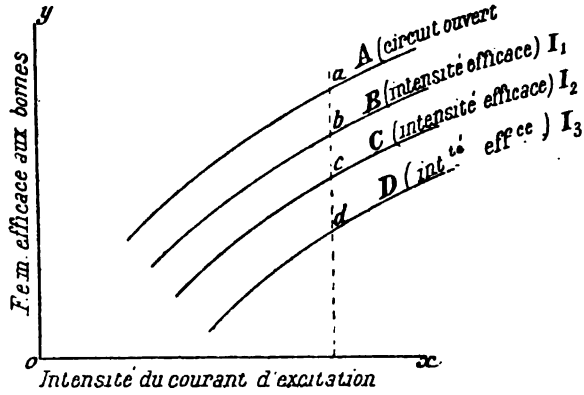


Fig. 22.

En traçant des courbes analogues B, C, D pour chacune desquelles, en faisant varier la résistance extérieure sans s. i. on maintient l'intensité efficace constante, on a le moyen de se rendre compte de la valeur de la réaction d'armature, la chute de potentiel due à la réaction d'armature étant donnée par la différence des ordonnées des diverses courbes.

On peut au moyen des diverses courbes, déterminer une nouvelle caractéristique, que M. Lucas appelle la *caractéristique sous exci-*

Digitized by Google

tation constante, en portant en abscisse l'intensité efficace et en ordonnée la chute du potentiel.

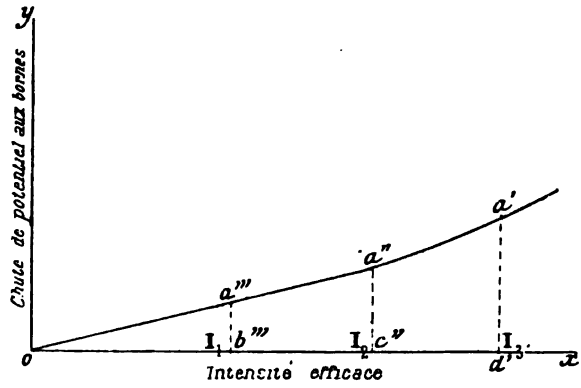


Fig. 23.

Cette courbe, dont la forme générale est indiquée sur la figure 23, peut également être déterminée par des mesures directes.

§ 6. — CLASSEMENT DES ALTERNATEURS

Dans le premier volume (page 130 et suivantes) nous avons vu que l'on peut classer les alternateurs :

1° D'après la forme de l'induit.

On a alors les alternateurs *à tambour, à anneau, à disque* ;

2° D'après le mode d'excitation.

On a alors les alternateurs *magnéto-électriques, auto-excitateurs* et à *excitation indépendante.*

Nous classerons les alternateurs, pour les étudier en détail, de la manière suivante :

1° Alternateurs monophasés à inducteur fixe et induit mobile ;

2° Alternateurs monophasés à inducteur mobile et induit fixe ;

3° Alternateurs monophasés à inducteur et induits fixes ;

4° Alternateurs polyphasés.

Dans chaque catégorie, nous étudierons les principaux alternateurs en les classant par ordre alphabétique, car il est souvent très difficile de déterminer avec exactitude quel est le premier en date.

Digitized by Google

§ 7. — ALTERNATEURS MONOPHASÉS A INDUCTEUR MOBILE ET INDUIT FIXE.

Le courant inducteur, provenant ordinairement d'une dynamo auxiliaire à courant continu, est amené à l'inducteur mobile par l'intermédiaire de balais frottant sur des bagues.

Comme l'inducteur est très lourd, dans les grandes machines il peut être commandé directement par le moteur, et servir de volant; c'est M. Gordon qui, le premier, a employé l'inducteur comme volant; puis M. Patin, M. Helmer, de la maison Cail etc.; la Société Helios, de Cologne, avait exposé en 1891, à Francfort, un alternateur volant du système Ganz.

Alternateur Cail-Helmer.

Ces alternateurs, que la Société des anciens établissements Cail désigne sous le nom d'*alternateurs à flux renversé*, sont de date récente; ils ont été étudiés par M. Helmer, ingénieur des services électriques de la Société.

Les noyaux des bobines inductrices et induites, qui sont en nombre égal, sont disposés de manière que les champs magnétiques se ferment suivant des plans passant par l'axe de la machine.

Quand les axes des deux bobines, induite et inductrice, coïncident, le champ magnétique, qui est complètement fermé, est constitué par deux portions analogues, séparées par l'entrefer, son intensité est alors maximum. L'intensité diminue ensuite jusqu'à ce que l'axe des bobines inductrices vienne coïncider avec la bissectrice de l'angle formé par les axes de deux bobines induites; à ce moment, les flux qui traversent les bobines induites sont minima, c'est-à-dire à peu près nuls.

Comme l'indiquent les figures 24, 25, 26 et 27, chacune des deux portions des circuits magnétiques se compose de deux séries de plaques de tôle rectangulaires, isolées entre elles et recourbées en forme de U. Deux branches de ces U sont accolées et constituent le noyau de la bobine.

La tôle extra-douce employée a 0,35 m. m. d'épaisseur; on en forme d'abord des paquets que l'on recourbe en forme de U, puis

Digitized by Google

on fait recuire l'ensemble. Après le recuit, on reprend les plaques de tôle une à une, et on les isole au moyen de papier.

Fig. 24.

Les deux U accolés sont ensuite disposés entre des rebords qui les maintiennent, puis fixés par des étriers intérieurs en bronze, maintenus par des boulons, qui sont isolés dans la partie traversant les tôles (fig. 27).

Digitized by Google

Dans les alternateurs de moyenne puissance, commandés par courroie, les noyaux inducteurs sont fixés à la périphérie d'un tambour formé par deux flasques clavetées sur l'arbre où elles sont maintenues à l'aide d'un écrou (fig. 25). Les noyaux induits sont fixés aux entretoises, assemblant deux couronnes formant carcasse (fig. 24).

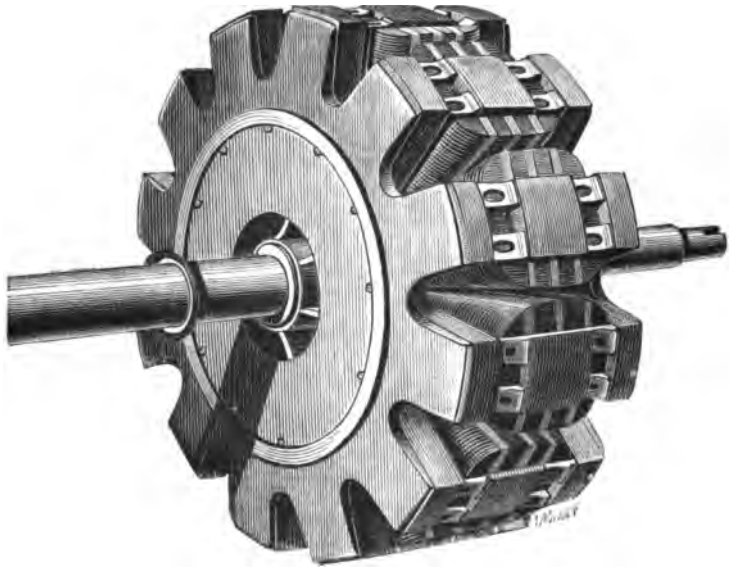


Fig. 25.

Afin d'éviter les brusques variations de flux, les surfaces extérieures des noyaux inducteurs sont légèrement convexes, tandis que les surfaces internes des noyaux induits sont planes (fig. 26). Quand les axes de deux bobines coïncident, l'entrefer va donc en augmentant de part et d'autre de l'axe commun.

Les bobines sont d'abord enroulées sur une carcasse en carton, puis enfilées sur les noyaux où elles sont maintenues par des bandes de cuir parcheminé. La figure 28 montre la disposition de ces bandes de cuir, disposées entre deux noyaux, qui, lorsqu'elles sont posées, ont la forme d'un U. Les extrémités sont fixées, soit au tambour, pour les bobines inductrices, soit à la carcasse pour les bobines induites.

Le cuir employé a une résistance de 7,5 kg. par m.m², et s'allonge excessivement peu sous l'influence de l'humidité.

Digitized by Google

Des trous percés dans le tambour de l'inducteur, et dans la carcasse de l'induit, assurent la ventilation.

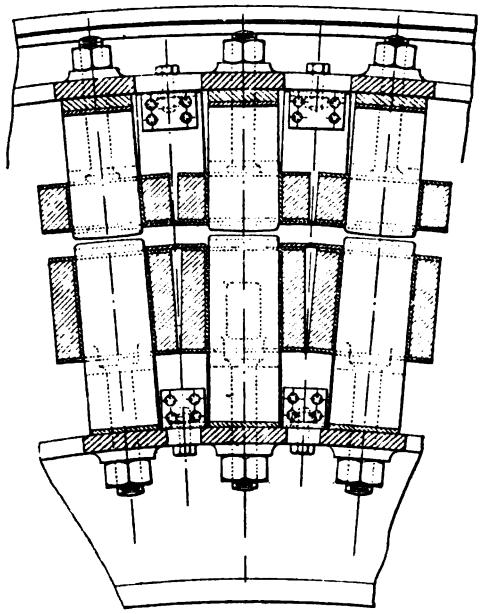


Fig. 26.

Afin de faciliter la réparation, une disposition spéciale permet de dégager complètement le tambour inducteur de la carcasse de l'induit, en le deplaçant latéralement.

Voici les principales données d'un alternateur de 30 k. w.

Différence de potentiel efficace.	2.400 volts.
Intensité efficace en ampères	12,5
Nombre de tours par minute	600
Nombre de bobines induites et inductrices . . .	12
Fréquence. $\left(\frac{600 \times 6}{60}\right)$ = ...	60
Induction maximum dans le fer induit (unités C.G.S)	5.600
Poids du fil induit. . . . . (kg).	50
Poids du fil inducteur. . . . . (kg).	90
Poids du fer des noyaux induits . . . . (kg).	150
Poids du fer des noyaux inducteurs . . . (kg).	308

Les *alternateurs volants*, du système Cail-Helmer, sont construits d'après les mêmes principes. La couronne induite en fonte est formée de deux morceaux, reliés par des boulons suivant un plan horizon-

Digitized by Google

tal. Elle repose, par l'intermédiaire de deux patins, sur deux glissières, de manière à pouvoir dégager, à un moment donné, l'inducteur formant volant.

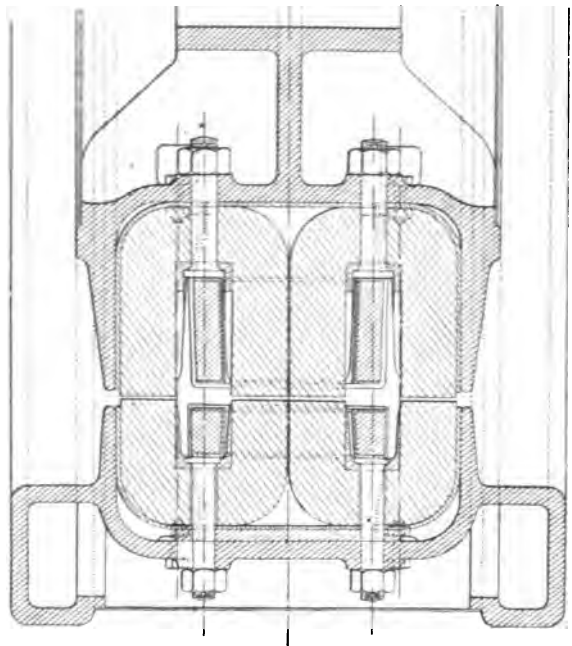


Fig. 27.

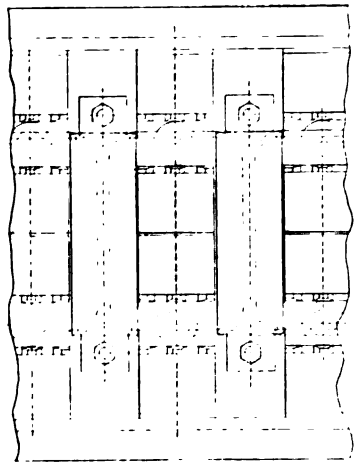


Fig. 28

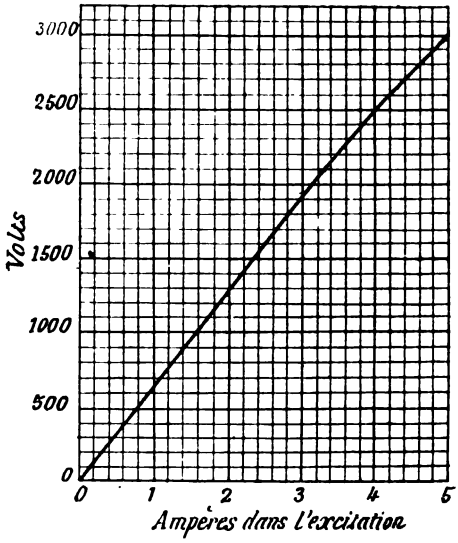


Fig. 29.

Digitized by Google

La couronne porte à la partie interne une sorte de rainure, dans laquelle entrent à force les noyaux induits, qui sont maintenus, comme nous l'avons dit, à la partie extérieure, au moyen d'étriers en bronze fixés par des boulons (fig. 27).

Les noyaux inducteurs sont fixés de la même manière dans une rainure ménagée à la partie extérieure du volant. Des ouvertures ménagées dans la couronne induite et dans la jante du volant assurent une ventilation énergique.

La figure 29 donne la courbe de l'intensité du champ magnétique à vide, pour différentes valeurs de l'intensité du courant excitateur, dans un alternateur Cail-Helmer.

Les avantages principaux, de la disposition adoptée par M. Helmer, sont la simplicité d'exécution et le peu de longueur du champ magnétique, ce qui fait que le volume du fer est faible, et que les pertes par hystérésis sont peu importantes.

Alternateur Elwell-Parker.

Ce type d'alternateur est construit par la maison Lowrie et Hall, et employé par la « House to house electric light supply C° de Londres. »

L'armature annulaire extérieure est formée par l'enroulement d'un ruban de fer au bois, avec interposition de papier; elle est maintenue par deux flasques en fonte dont elle est isolée:

Sur la surface interne de l'armature, sont rapportées les bobines induites, avec noyau en bois, qui sont légèrement courbées pour bien épouser la forme de l'anneau, et sont maintenues par des lames de bois vissées à l'armature, en dehors de la partie où agissent les bobines inductrices.

L'inducteur intérieur consiste en un anneau en fer forgé portant des pièces polaires, également en fer forgé. Ces pièces polaires servent de noyaux aux bobines inductrices; les enroulements de ces bobines sont inversés, de sorte que l'on a alternativement un pôle nord et un pôle sud.

Il y a autant de bobines inductrices que de bobines induites.

Les alternateurs Elwell Parker de 200 chevaux, employés à la station de West Brompton à Londres, comportent 28 pôles et 28 bobines induites, reliées en série, chacune d'elles fournissant 70 v., soit en tout 2000 v.

Digitized by Google

Alternateur Ganz (Zipernowsky).

Pour les petits alternateurs, la dépense d'une excitatrice à courant continu est exagérée; aussi la maison Ganz construit-elle des alternateurs de faible puissance, auto-excitateurs.

Si le courant fourni par l'alternateur est à haute tension, on le transforme en courant à basse tension au moyen d'un transformateur T (fig. 30).

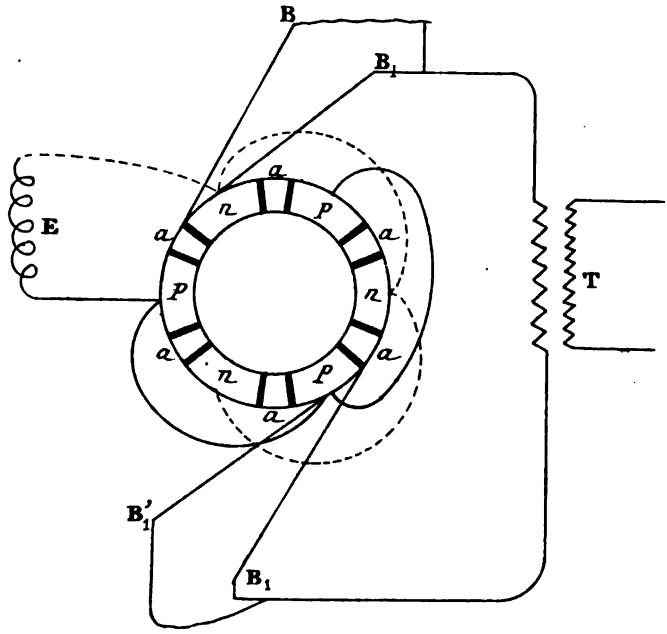


Fig. 30

Le commutateur inverseur (fig. 30 et 31) est un cylindre partant des sections isolées; les sections *p* sont reliées à une des extrémités du circuit d'excitation E de l'alternateur; les sections *n* à l'autre extrémité de ce circuit.

Les petites sections *a* communiquent entre elles.

Chacune des extrémités du circuit direct induit ou du circuit secondaire du transformateur T communique avec une paire de balais BB' et B_1 B'_1; les balais sont calés de manière à intervertir les communications à chaque alternance du courant, de sorte qu'il circule dans les bobines excitatrices un courant redressé toujours de même sens.

Les doubles balais ont pour objet de mettre les bobines inductrices

Digitized by Google

en court circuit, pendant la durée de l'inversion du courant induit (la figure 30 représente les balais dans cette position); il naît alors dans les bobines excitatrices un extra-courant qui prolonge le courant antérieur et adoucit les ondulations du flux excitateur.

L'angle de calage des balais se détermine à la manière ordinaire, en déplaçant ces derniers au moyen des colliers qui les supportent, jusqu'à la réduction des étincelles au minimum.

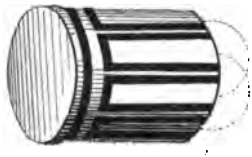


Fig. 31.

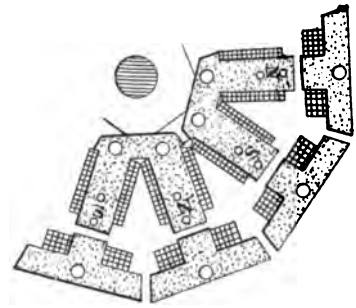


Fig. 32

La figure 32, donne le schéma de l'alternateur; les noyaux des bobines induites sont formés de pièces en forme de T, ceux des bobines inductrices sont constitués au moyen de pièces en forme de V.

Ces pièces sont constituées par des tôles minces, isolées les unes des autres par des feuilles de papier; dans l'inducteur les joints sont alternés, de manière à rendre les diverses dents de l'étoile solidaires les unes des autres.

L'étoile formant l'inducteur, étant ainsi construite, est fortement serrée entre deux disques de bronze (fig. 33 et 34) au moyen de boulons et fixée sur l'arbre à l'aide de butées. Les bobines enroulées sur des carcasses en zinc, sont ensuite glissées sur les dents de l'étoile et y sont maintenues par des pièces en bronze, fixées aux noyaux par des boulons.

La couronne feuilletée de l'induit est serrée au moyen de boulons entre deux plaques de bronze et fixée au moyen d'autres boulons à des entretoises reliant deux flasques en fonte, qui supportent l'ensemble.

Les bobines inductrices sont enroulées sur des formes en fibre vulcanisée et fixées ensuite sur les noyaux.

Dans les machines de grandes dimensions, l'induit peut être retiré

Digitized by Google

tout d'une pièce, sur des glissières, ce qui permet les réparations à l'inducteur.

M. Zipernowski, a par la disposition suivante, rendu l'alternateur Ganz, autorégulateur pour tension constante. Un certain nombre de bobines de l'induit (une pour un alternateur à huit bobines) servent à alimenter directement les bobines inductrices par l'intermédiaire d'un redresseur de courant.

Dans le circuit excitateur, en avant du redresseur est intercalé le circuit secondaire d'un transformateur dont le circuit primaire est placé en série dans le circuit principal, alimenté par les autres bobines de l'induit.

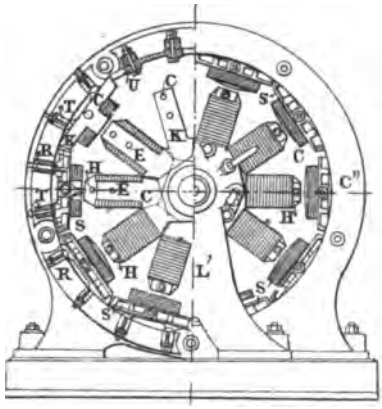


Fig. 33.

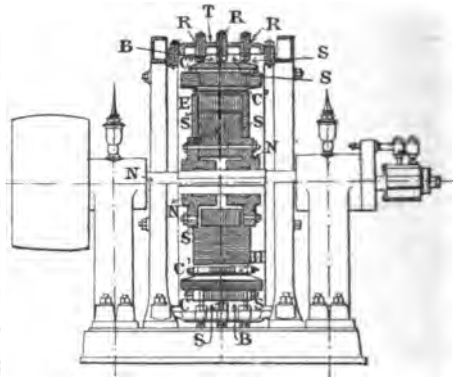


Fig. 34.

Si le courant du circuit principal augmente, la perte de voltage sur la ligne augmente.

Mais comme le transformateur a son primaire parcouru par un courant de plus grande intensité, l'intensité dans le secondaire augmente, l'intensité du courant d'excitation croît et la tension se relève aux bornes. On peut donc, en proportionnant convenablement le transformateur, obtenir un voltage constant en un point de la ligne, quelle que soit la charge.

La Société Hélios, de Cologne, avait exposé en 1891 à Francfort, un alternateur volant du système Ganz, de 400 k. w., 2.000 v., 200 a., à la vitesse normale de 125 tours à la minute. L'induit comportait 40 bobines, couplées en deux séries, l'inducteur avait 2,992 m. de diamètre et 0,38 m. de largeur.

Digitized by Google

Le tableau suivant donne les résultats des essais de cet alternateur, au point de vue de l'intensité du courant d'excitation, à diverses charges.

Nombre de tours par minute	Courant d'excitateur en ampères	Voltage aux bornes	Puissance utile en chevaux
127	104	2040	536
130	84	2030	385
132	74	2030	282
133	64	2030	151
133	56	2050	0

MM. Schneider et Cie, du Creusot, concessionnaires pour la France des brevets Ganz-Zipernowski, construisent des alternateurs du type Ganz, dont la puissance varie de 10 à 360 k., w. à la fréquence de 41,66 par seconde.

L'alternateur Gramme a été combiné pour brûler les bougies Jablochkoff.

L'induit constitué par un fer doux annulaire, muni d'un enroulement Gramme est maintenu par deux flasques en fonte à peu près circulaires, reliées par des entretoises (fig. 35).

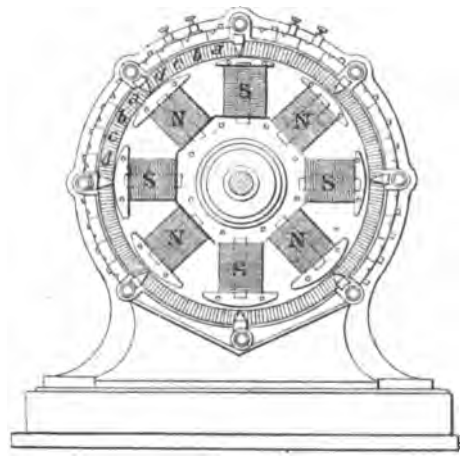


Fig. 35

L'inducteur est constitué par des électro-aimants à épanouissements polaires, fixés à un moyeu en fonte. Dans l'alternateur représenté sur la figure, l'inducteur a 8 pôles et l'induit 32 bobines. Chaque bobine communique avec des bornes, permettant de les relier, soit en série, soit en quantité. On peut avoir ainsi, soit 32 circuits distincts, soit 16, soit 8, soit 4.

Dans ces circuits, les quatre courants sont décalés de $\frac{1}{8}$ de période

Digitized by Google

de l'un à l'autre, de sorte que l'alternateur fournit en somme des courants polyphasés.

Alternateur Lontin. — Cet alternateur est un des plus anciens. L'inducteur comporte des électro-aimants alternés, placés radialement autour d'une culasse centrale.

L'armature extérieure est formée d'un anneau qui porte radialement à l'intérieur des projections autour desquelles sont enroulées les bobines induites qui sont en nombre égal à celui des pôles inducteurs.

Alternateur Mordey. — Cet alternateur construit par la Société Brush, est d'un type tout à fait original. L'inducteur est constitué par un noyau court, en fer forgé, monté sur l'arbre entouré par la bobine excitatrice unique (fig. 36). Sur ce noyau sont fixées solide-

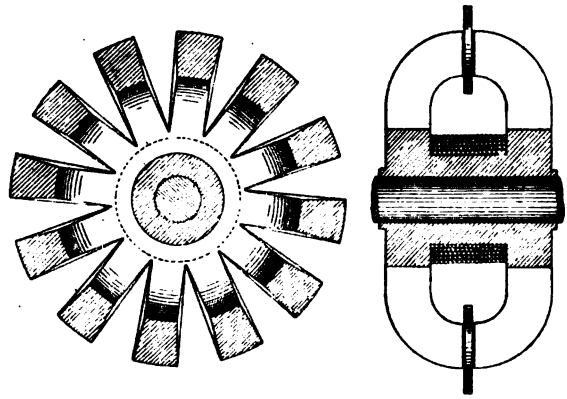


Fig. 36.

ment de part et d'autre deux sortes de calottes en fer, portant des bras rayonnants recourbés de manière à venir en face les uns des autres en laissant un petit espace vide (de 17 à 20 m. m.), dans lequel est placé l'induit.

Il est facile de voir que le flux magnétique, dû à l'excitation de la bobine centrale vient se fermer par les bras, à travers l'induit, et que tous les pôles d'un même côté de l'induit ont même polarité, c'est donc un alternateur à champs magnétiques non alternés.

Les deux calottes formant les bras, sont recouvertes d'une tôle pour diminuer la résistance de l'air.

L'induit fixe est constitué par une couronne en bronze divisée en

Digitized by Google

deux parties, suivant un plan médian horizontal; ces deux parties sont reliées par des boulons. La partie inférieure (fig. 37) porte des patins, qui sont boulonnés sur le socle de la machine.

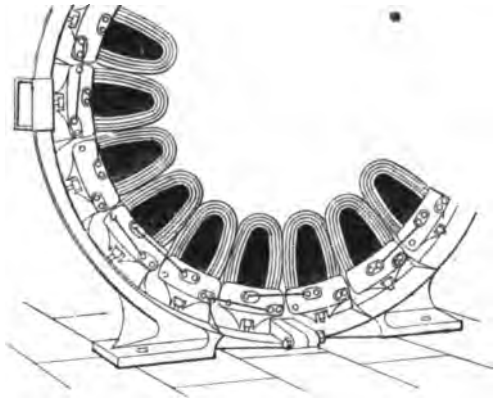


Fig. 37.

Les bobines en nombre double de celui des champs inducteurs, disposées dans l'espace entre les pôles, sont constituées par des rubans de cuivre de 7 à 15 mm. de largeur, isolés par de la fibre et enroulés sur de noyaux en ardoise ou en porcelaine. Deux bobines adjacentes ont leurs enroulements inversés.

La figure 38, indique le mode de liaison des bobines entre elles, on voit que deux bobines consécutives, quoique identiques sont ainsi parcourues en sens inverse par un courant donné.

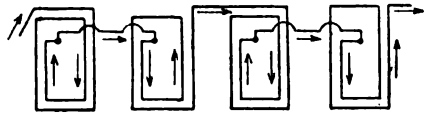


Fig. 38.

Ces bobines sont fixées à plat sur la collerette intérieure de la couronne de bronze et y sont maintenues par trois boulons passant dans des trous légèrement ovalisés, permettant ainsi aux segments de se mouvoir dans leur plan, avant la fixation définitive.

Les fils de liaisons des bobines étant en dehors des pôles sont supportés par des isolateurs en porcelaine. L'isolement des bobines est très facile à obtenir et comme elles sont très bien isolées, la densité

Digitized by Google

du courant peut atteindre de 4 à 6 ampères par m. m.² de section du ruban.

La dépense de travail pour l'excitation est très faible, car la résistance magnétique se réduit pour ainsi dire à celle de l'entrefer, qui est très court.

Afin d'éviter un déplacement latéral de l'inducteur, l'arbre porte des cannelures, ou mieux dans les types plus récents, des bagues ajustées sur les portées, empêchant tout jeu latéral.

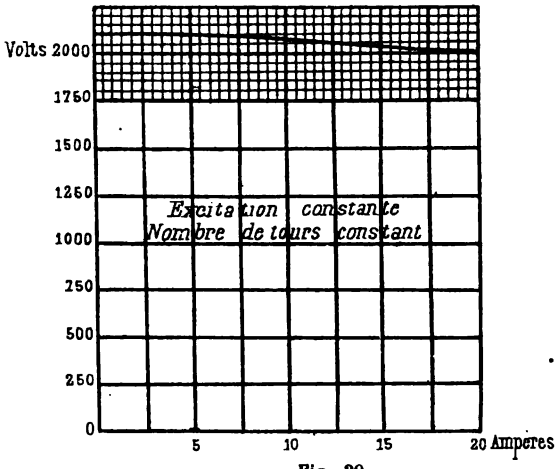


Fig. 39

Comme il n'y a pas de fer dans l'induit, la s. i. est très faible et la machine est presque autorégulatrice, à potentiel constant (sur une résistance sans s. i.). La figure 39 donne la caractéristique à excitation constante d'un alternateur A_9 (le nombre qui suit la lettre A indique le nombre de champs de l'alternateur). Cette machine qui a une puissance utile de 37,5 k.w., à 666 tours à la minute, la fréquence étant 100 $\left(F = \frac{9 \times 666}{60}\right)$, a un coefficient de s. i. moyen de 0,03 quadrant, la résistance de l'armature est de 3 ohms.

Les données suivantes se rapportent à un alternateur Mordey Victoria, construit pour l'usine de Newcastle on the Tyne.

Puissance 250 k. w., tension eff. aux bornes 2.000 v., nombre de champs 20, nombre de bobines induites 40, tours par minute 300.

Chaque bobine induite embrasse un angle de 9° et a 180 m. m. de largeur, le ruban de cuivre formant l'enroulement a une largeur de 15 m.m.

Sous excitation constante (2.800 w.), la chute de potentiel entre la pleine charge et la marche à vide est de $4\frac{1}{2}$ %.

La machine étant excitée pour la pleine charge (3,650 w.) l'élévation de potentiel à vide est de 12 %. Le rendement électrique à pleine charge (y compris l'excitation) est de 97 %.

Digitized by Google

Le rendement commercial (garanti) à pleine charge est de 93 %.

Le poids de l'électro-aimant et de l'arbre est de 15 tonnes, le poids total de la machine est de 20 tonnes.

Alternateur Patin. — M. Patin, qui fut longtemps l'associé et le collaborateur de M. Ferranti, a combiné un alternateur dont les in-

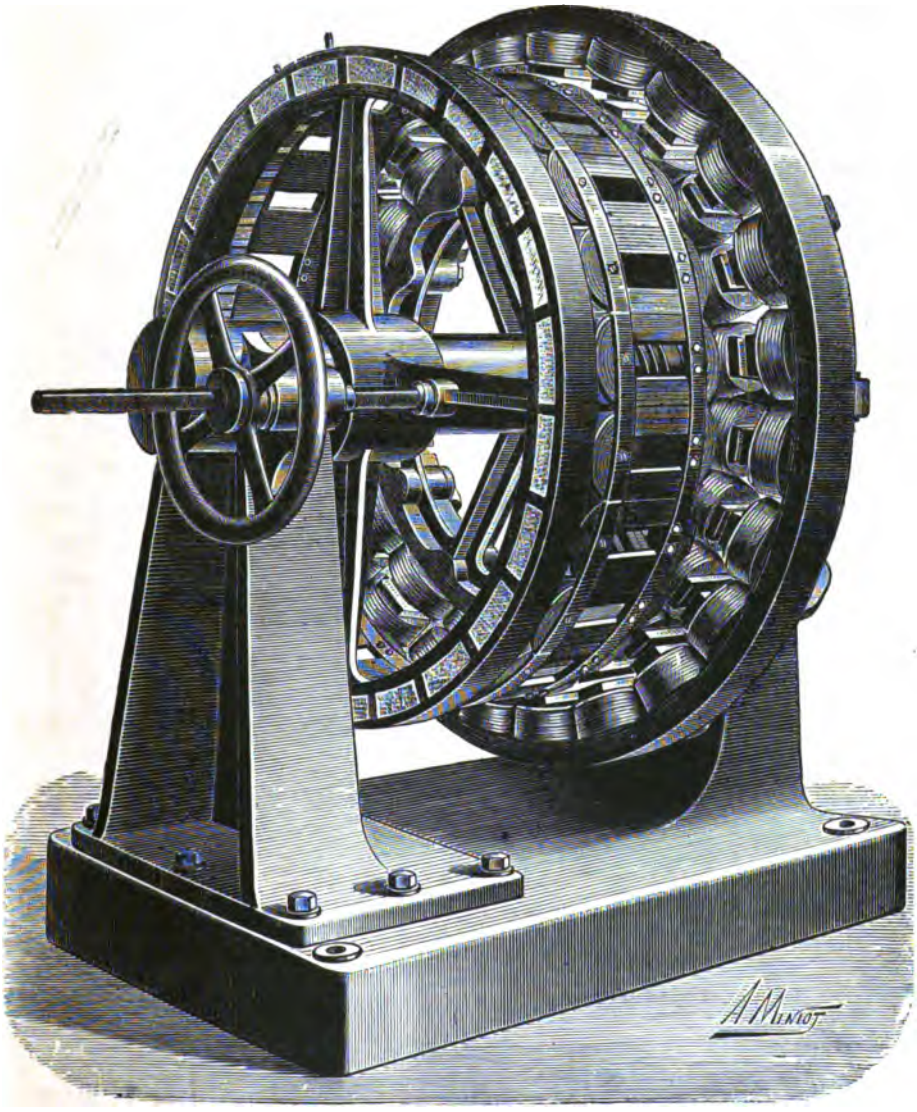


Fig. 40.

Digitized by Google

ducteurs peuvent jouer le rôle de volant. Les bobines inductrices (fig. 40) sont disposées radialement, les unes à l'intérieur d'un anneau extérieur et les autres à l'extérieur d'un anneau intérieur, de manière à se faire face. Les pièces polaires de forme rectangulaire laissent entre elles un étroit espace, dans lequel est disposé l'induit. Les pôles des bobines disposées sur chaque anneau, sont alternativement de signes contraires et les pôles de deux bobines de chacun des anneaux, se faisant face, sont de signes contraires. Il est facile de voir que le flux magnétique qui traverse deux bobines disposées en face l'une de l'autre, se partage en deux parties dans les anneaux, pour aller se fermer à travers les bobines disposées de part et d'autre des bobines considérées. On obtient ainsi une série de champs magnétiques alternativement de sens contraires.

Les bobines induites plates sont formées d'un ruban de cuivre enroulé sur un noyau en bronze évidé, les spires étant soigneusement isolées entre elles par de la fibre. Ces bobines sont fixées au moyen de boulons sur deux anneaux en bronze dont elles sont isolées. Ces bobines, enroulées toutes dans le même sens, sont reliées entre elles comme il est indiqué sur le schéma de la figure 38 (page 37).

L'induit, supporté par quatre bras, est monté sur un fourreau entourant l'arbre ; une vis de rappel manœuvrée au moyen d'un volant permet de déplacer cet induit dans le sens de l'arbre et de le dégager de l'inducteur pour l'examiner et le réparer au besoin.

§ 8. — ALTERNATEURS MONOPHASÉS A INDUCTEUR FIXE ET INDUIT MOBILE

Dans ces alternateurs, le courant est recueilli au moyen de balais frottant sur deux bagues reliées aux bobines de l'induit.

Alternateur Ferranti (Fig. 40 à 45). — L'inducteur est constitué par deux séries de bobines à axe horizontal, se faisant face et produisant des champs magnétiques alternés.

Les noyaux en fer de ces bobines sont pris dans la fonte des flasques qui les maintiennent.

L'ensemble est divisé en deux parties, suivant un plan vertical et

Digitized by Google

ces deux parties sont mobiles sur glissières, de sorte que l'on peut les écarter pour visiter l'induit intérieur. Lors de la réunion des deux pièces, l'attraction magnétique dispense d'employer des moyens de consolidation énergiques.

L'induit dépourvu de fer et de forme aplatie tourne entre les deux séries de pôles qui sont très rapprochés (ordinairement 19 mm. pour les grandes machines). Dans les petites machines, comme l'indique la figure 41, l'induit est constitué par des bobines formées par l'enroulement d'un unique ruban de cuivre.

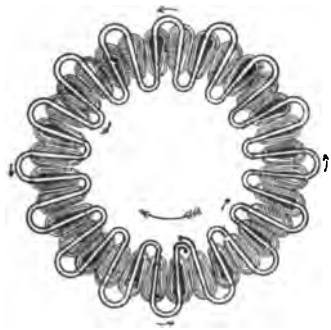


Fig. 41.

Fig. 42.

Les bobines des machines puissantes ont la forme indiquée sur la figure 42. Les noyaux rigides sont constitués par des bandes de laiton isolées entre elles par de l'amiante, brasées à une extrémité et reliées à l'autre extrémité à un bloc de laiton percé d'un trou. La bobine est formée d'un ruban de cuivre légèrement plissé, et les diverses spires sont isolées entre elles au moyen de rubans de fibre vulcanisée. L'extrémité de l'enroulement à la partie interne est soudée au noyau de laiton.

Deux bobines fixées à un même porte-bobines (fig. 43) sont isolées l'une de l'autre par un morceau de fibre et du porte-bobines par des feuilles de mica et de fibre. Les extrémités intérieures des enroulements des bobines communiquent entre elles par l'intermédiaire du boulon de fixation et du porte-bobines.

Les extrémités extérieures de l'enroulement de deux bobines adjacentes fixées à deux porte-bobines différents sont soudées entre elles. On a donc les mêmes connexions que celles représentées schématiquement sur la figure 38, c'est-à-dire que les enroulements de

Digitized by Google

deux bobines consécutives sont inversés, ce qu'il faut obtenir, car l'alternateur comporte autant de bobines induites que de champs magnétiques (alternés).

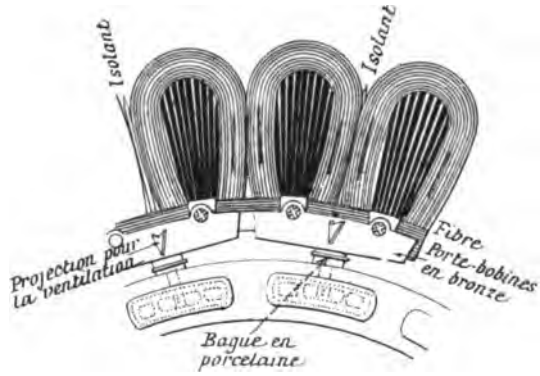


Fig. 43.

Comme les porte-bobines sont reliés électriquement à l'enroulement induit, il faut qu'ils soient soigneusement isolés. Ils portent à la partie inférieure une sorte de queue, à l'extrémité de laquelle est ménagé, soit un trou dans lequel on peut passer une goupille, soit un pas de vis sur lequel on visse un boulon, jouant le même rôle que la goupille. On place d'abord une bague en porcelaine sur la queue, puis on fait pénétrer cette dernière dans la jante d'un plateau circulaire en bronze, formant moyeu, par un trou de diamètre un peu plus grand que le sien ; on place ensuite, soit la goupille, soit le boulon, faisant en sorte que ni la queue ni la goupille ne touchent au moyeu et l'on coule un mélange de soufre fondu et de verre pulvérisé qui fixe l'ensemble, tout en isolant électriquement le porte-bobines du moyeu.

Ordinairement les bobines sont montées en deux séries parallèles, comme l'indique la figure 44; deux tiges de cuivre aboutissant aux bagues collectrices sont reliées aux parties intérieures de deux bobines, situées aux extrémités d'un même diamètre. Les bagues collectrices et les balais sont montés à une des extrémités de l'arbre et enfermés dans une cage en verre.

La figure 45, empruntée au *Traité théorique et pratique des Machines dynamos électriques* de M. S. Thomson, traduit et adapté par

Digitized by Google

M. E. Boistel, donne la coupe longitudinale d'un alternateur Ferranti de 1.250 chevaux à 10.000 volts.

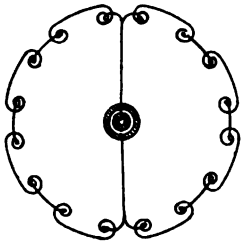


Fig. 44.

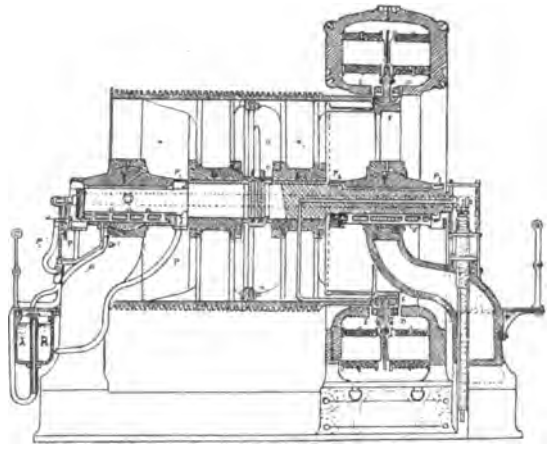


Fig. 45.

Le nombre de tours est de 120 à la minute; chaque couronne porte 48 pôles $\left(F = \frac{24 \times 120}{60} = 48\right)$; la commande s'effectue par l'intermédiaire d'une poulie à gorge de 3 mètres de diamètre et de plus de 3 mètres de largeur.

Le 48 bobines induites, d'une épaisseur de 19 millimètres, forment un anneau de 4,5 m. de diamètre extérieur, dont la vitesse périphérique est de 29,67 m. à la seconde.

Les coussinets ont une grande surface et sont alimentés automatiquement d'huile, envoyée par une pompe, mue par un excentrique, fixé à l'extrémité de l'arbre, opposée à celle où est adapté le collecteur.

L'*alternateur Kapp* des ateliers d'Oerlikon, est constitué de la manière suivante :

Deux couronnes d'électro-aimant sont fixées à des flasques en fonte verticales (fig. 46. et 47), qui sont reliées par des boulons formant entretoise.

Chacune des couronnes comporte des pôles alternativement positifs et négatifs, mais un pôle positif d'une couronne est opposé à un pôle de même nom de l'autre couronne, de sorte que les champs magnétiques alternés se forment d'un pôle à l'autre d'une même couronne. On a donc, en somme, deux séries de champs magnétiques.

Digitized by Google

L'armature est constituée par un ruban de fer au bois, enroulé avec interposition de papier sur un disque en bronze. Ce ruban forme donc un anneau, qui est relié, ainsi que l'indique la figure 46; au disque de bronze au moyen de boulons placés diamétralement.

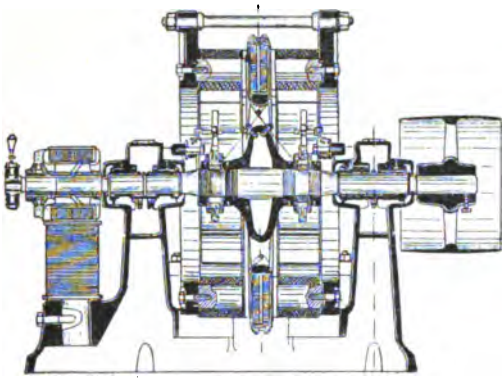


Fig. 46

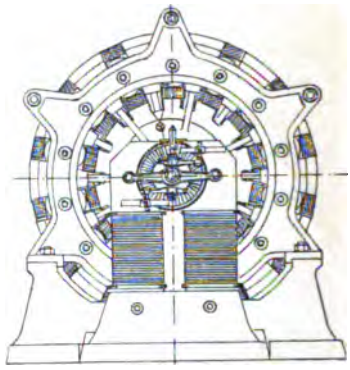


Fig. 47

Le noyau des bobines ainsi formé, est soigneusement isolé au moyen de mica et de papier et l'enroulement est effectué de telle sorte que les spires sont placées dans des plans diamétraux. La largeur angulaire d'une bobine est égale au pas de l'alternateur. Ces bobines sont maintenues par des coins en ébonite.

L'alternateur de 80 chevaux, 2.000 v., 30 a., a un poids total de 3.550 kg. et fait 600 tours à la minute.

Chaque couronne inductrice a 14 électro-aimants cylindriques en fer forgé, avec épanouissements rectangulaires. Chaque bobine comporte 186 spires, la résistance totale est de 1,76 ohms, l'intensité du courant d'excitation de 21 a.

L'induit comporte également 14 bobines; ces bobines dont l'enroulement est constitué par deux couches de fil de 3 mm. de diamètre, isolé au moyen de trois couches de coton, ont 80 spires. La résistance totale du circuit induit est de 1,8 ohms.

Les alternateurs de 200 k. w. de la station centrale de Zurich, ont une tension de 2.000 v. aux bornes. L'inducteur a 30 paires de pôles, l'induit de 2,60 m. de diamètre fait 200 tours à la minute.

Alternateur Labour. — Les alternateurs Labour que construisait anciennement la société l'Eclairage électrique, étaient à haut poten-

Digitized by Google

tiel et d'un type analogue à celui des alternateurs Siemens, que nous étudierons plus loin. La Société ayant reconnu qu'il était plus avantageux d'employer des alternateurs à basse tension, quitte à disposer des transformateurs pour élever le potentiel dans la ligne, M. Labour, ingénieur des services électriques, a étudié le nouveau type d'alternateur que nous allons décrire, dans lequel il s'est surtout ingénié à obtenir une courbe de la f. e. m. se rapprochant le plus possible d'une sinusoïde.

Les bobines inductrices, dont les noyaux sont constitués par des tôles minces isolées entre elles, sont disposées à l'intérieur d'une couronne en fonte (fig. 48). Ces bobines enroulées de manière à

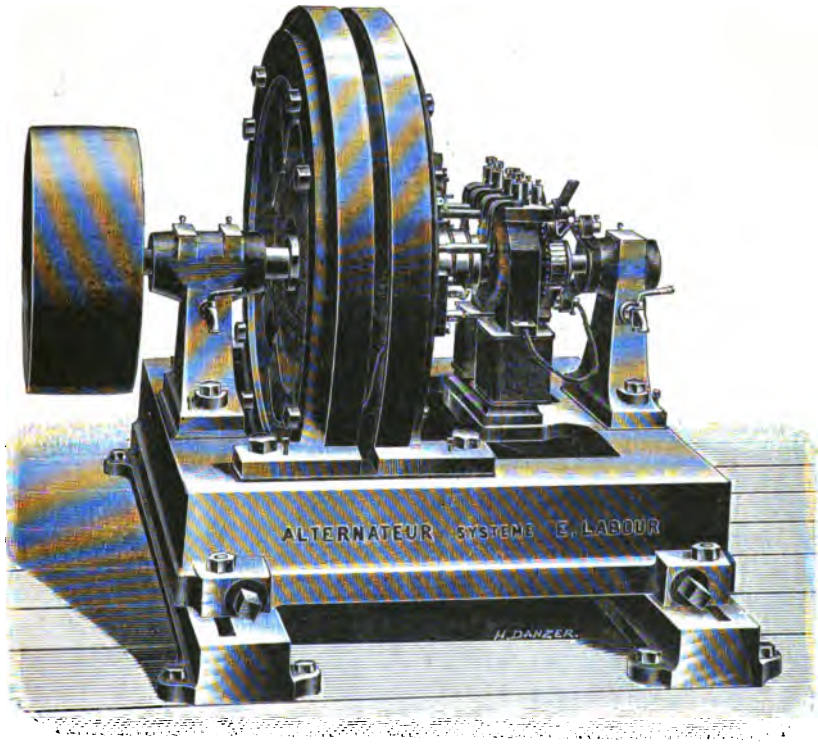


Fig. 48

produire alternativement des pôles de sens contraire, sont munies d'épanouissements polaires très prononcés. L'intervalle entre deux épanouissements polaires est au plus égal au double de l'entrefer, et de plus ces épanouissements ont dans le sens de l'axe, une section décroissante au fur et à mesure qu'ils se rapprochent de l'induit.

Digitized by Google

La figure 49, empruntée à un article de M. Guilbert, paru dans la *Lumière électrique*, du 21 octobre 1893, donne le schéma de montage des bobines induites.

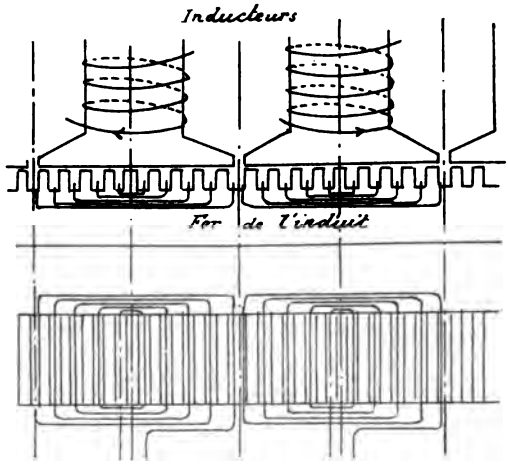


Fig. 49

Les extrémités des épanouissements polaires, par suite des dérivations magnétiques sont saturées, de sorte que l'intensité du champ traversant l'entrefer pour pénétrer dans l'induit et venir se former à la bobine suivante, est maximum vers l'axe de la bobine et va en diminuant jusqu'aux extrémités des épanouissements. L'espace où le champ est nul est excessivement réduit, de sorte qu'il n'y a pas de variation brusque de la f. e. m. induite.

L'induit est formée d'un anneau en tôle feuilletée, muni de dents à la partie extérieure, tout à fait analogue à l'induit d'une dynamo Rechniewski. On a ainsi, comme dans ces dynamos, une variation de la résistance magnétique et par conséquent variation du flux dans les épanouissements des inducteurs; mais, comme les dents sont de petites dimensions et les inducteurs feuilletés, les pertes par courants de Foucault, dues à ce fait, sont négligeables.

Les bobines induites sont enroulées, comme l'indique le schéma de la figure 49. La largeur des noyaux des divers éléments, dont est constituée la bobine, vont en augmentant. Chacun de ces éléments, comporte une ou plusieurs spires. Le nombre de spires est choisi,

Digitized by Google

de manière à donner une courbe aussi rapprochée que possible de la forme théorique.

Ainsi dans un alternateur livré à l'administration des phares, comportant huit bobines, placées quatre par quatre en série, l'induit a 72 dents, ce qui correspond à 9 dents par bobine, l'enroulement est constitué de la manière suivante :

8 spires autour de la dent du milieu.
8 spires autour des 3 dents du milieu.
8 » » 5 » »
8 » » 7 » »
4 » » 9 dents, c'est-à-dire à la partie extérieure des bobines,

Si on désigne par S la section d'une dent le produit du nombre de spires par la section moyenne est :

$$(8 + 8 \times 3 + 8 \times 5 + 8 \times 7 \times 4 \times 9)\ S = 8 \times 20{,}5\ S.$$

M. Blondel a tracé la courbe de la f.e.m. et de l'intensité du courant de cet alternateur, qui sont indiquées sur la figure 50, on voit que ces courbes sont très régulières.

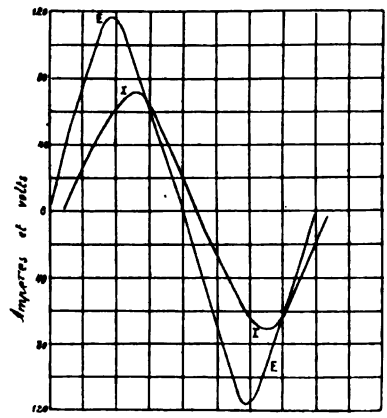


Fig. 50

Les dispositions prises pour assurer la régularité de la courbe de la f. e. m., ont pour résultat de supprimer complètement les ronflements dans les alternateurs de ce type.

M. Labour a combiné plusieurs dispositifs pour l'excitation, il a d'abord placé sur l'enroulement un collecteur pour courant continu, mais reconnaissant l'inconvénient d'avoir un circuit unique pour le courant continu et le courant alternatif, il a disposé sur l'anneau un second circuit enroulé d'après le type Gramme.

Ordinairement, l'excitation est obtenue au moyen d'une petite dynamo à courant continu, montée sur l'arbre de l'alternateur (fig. 48). Cette dynamo excitée en dérivation, est munie d'un rhéostat permettant de faire varier son excitation, c'est le rhéostat de *shunt*, qui sert

Digitized by Google

à régler l'intensité du courant envoyé dans les électros de l'alternateur.

Dans le circuit des inducteurs de l'alternateur est placé un second rhéostat, appelé *rhéostat des inducteurs*.

Ce dernier rhéostat sert à assurer l'amorçage de l'exitatrice, dans le cas où l'altèrnateur est faiblement chargé à la mise en marche. Comme l'excitation doit alors être faible, la f. e. m. aux bornes des inducteurs ne permettrait pas d'obtenir l'amorçage de l'excitatrice. On augmente la f. e. m. aux balais, pour un faible courant, en augmentant la résistance du circuit au moyen du rhéostat. En marche normale, ce rhéostat est retiré et le réglage se fait au moyen du rhéostat shunt.

Un alternateur, donnant 300 ampères à 110 volts, à la vitesse de 500 tours, exige un courant d'excitation de 14 ampères.

La vitesse et l'excitation étant constantes, la variation de la f. e. m. entre la marche à vide et la pleine charge est de 10 %.

L'excitation à vide est de 8 à 9 ampères.

Le rhéostat des inducteurs comporte 20 touches et a une résistance maximum de 3 ohms; le rhéostat de shunt de la dynamo excitatrice supporte 2 ampères et a une résistance maximum de 70 ohms; il comporte également 20 touches.

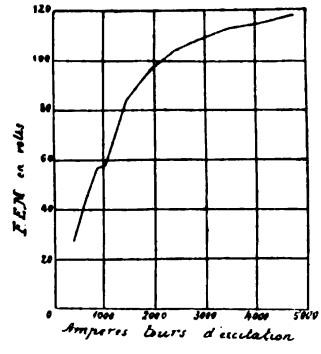


Fig. 51

La figure 51 donne la caractéristique à vide d'un alternateur Labour de 8.000 watts, dont le rendement industriel est de 84 %. Ce rendement est excellent, si l'on considère la faible puissance de l'alternateur.

Alternateurs de Méritens.— Ces machines, construites par la Société l'*Alliance*, ont été les premières employées pour l'éclairage des phares.

Le champ magnétique est constitué par des aimants permanents, composés de lames superposées.

L'induit comporte autant de bobines que de pôles. Ces bobines, dont les noyaux sont formés de tôles feuilletées, sont montées sur une poulie en bronze; l'angle, au centre d'une bobine, est égal à la distance angulaire de deux pôles.

Digitized by Google

Ces machines sont bien construites, et fonctionnent très régulièrement, mais leur prix est plus élevé et l'emplacement qu'elles occupent est plus considérable que pour un alternateur ordinaire de même puissance.

Alternateur Siemens (fig. 52). — L'induit est constitué, comme celui de la machine Ferranti, par deux séries de bobines horizontales, fixées à des flasques verticales en fonte. Les bobines opposées des deux couronnes sont de polarités différentes, de sorte que les champs alternés, comme ceux de la machine Ferranti, se ferment d'une couronne à l'autre.

Les noyaux des bobines en fer forgé, sont pris dans la fonte des flasques. Les bobines sont d'abord enroulées sur des carcasses en laiton, puis passées sur les noyaux.

Les bobines induites (fig. 52) sont montées sur un plateau fixé sur l'arbre. Elles sont formées d'un ruban de cuivre enroulé sur un noyau en bois; l'isolement entre les diverses spires est obtenu par l'interposition de papier spécial ou de fibre.

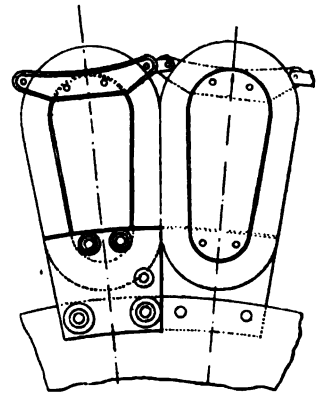


Fig. 52

Les bobines sont fixées au plateau par l'intermédiaire de plaques de maillechort (métal qui a une grande résistance électrique, et qui par conséquent donne lieu à une faible perte de travail par courants de Foucault) reliées aux noyaux des bobines et au plateau par des boulons

Ces plaques sont isolées des bobines, et les connexions de ces dernières entre elles (voir le schéma de la figure 38) sont effectuées au moyen de boulons isolés des plaques et reliés entre eux.

Un chaînage, constitué par des pièces de laiton isolées, est adapté à l'extrémité extérieure des bobines, et contribue à la résistance de ces dernières à l'action de la force centrifuge.

Alternateur Thomson-Houston.— Les pièces polaires en acier fondu sont placées à l'intérieur d'un anneau disposé verticalement qui, pour la commodité des réparations, est formé de deux parties, réunies par des boulons, suivant un plan horizontal.

L'armature est constituée par un cylindre en tôles feuilletées, sur

Digitized by Google

lequel sont placées les bobines induites. Ces dernières sont constituées par un noyau en substance isolante, enroulé de fil de cuivre de section rectangulaire.

Il y a autant de bobines induites que de pièces polaires. Les champs magnétiques entre deux pôles consécutifs se ferment d'une part à travers l'anneau, et d'autre part, franchissant l'entrefer deux fois, par l'armature, en traversant les bobines induites. Les bobines, après avoir été courbées sur une forme, afin de bien épouser la surface cylindrique de l'armature, en sont isolées au moyen de mica. Un enroulement de fil de maillechort les entoure et les maintient sur l'armature.

La Société Thomson-Houston construit trois types d'alternateurs, qui diffèrent par le mode d'excitation :

1° Des alternateurs auto-excitateurs ; 2° des alternateurs à excitation séparée, et 3° des alternateurs à excitation compound.

L'alternateur à excitation compound est destiné à maintenir constante la tension en un point de la ligne.

A cet effet, comme l'indique la figure 53, un certain nombre de bobines inductrices sont parcourues par le courant de l'excitatrice, et

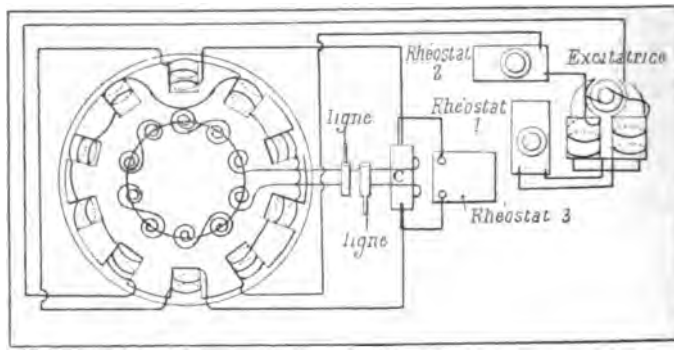


Fig. 53

les autres par le courant redressé de l'alternateur, ou bien comme l'indique la figure 54, chacune des bobines inductrices a deux enroulements, l'un parcouru par le courant de l'excitatrice, l'autre par le courant redressé de l'alternateur.

Le commutateur redresseur C, portant autant de touches qu'il y a de bobines, est en relation d'une part avec le fil de l'armature, et de l'autre avec le fil de ligne.

Digitized by Google

L'intensité du courant redressé augmente à mesure que l'intensité du courant de l'alternateur augmente, c'est-à-dire que la perte de charge dans la ligne augmente. Dans ce cas, l'excitation augmente, ainsi que la f. e. m. aux bornes, de sorte que la tension en un point donné peut être maintenue constante.

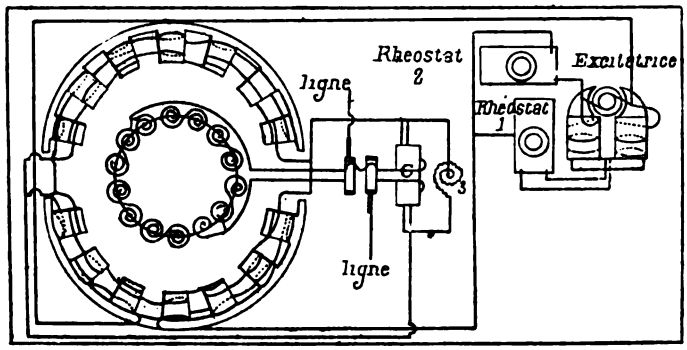


Fig. 54

Les rhéostats 1 et 2 permettent de régler l'intensité du courant de l'excitatrice et le rhéostat 3 l'intensité du courant redressé. En ajustant convenablement les résistances de ces rhéostats, on peut rendre la machine autorégulatrice de potentiel, pour un point donné de la ligne.

Alternateur Westinghouse. — Les pièces polaires sont disposées radialement à l'intérieur d'un anneau en acier fondu. Sur ces pièces sont placées les bobines, maintenues par des boulons et enroulées de telle sorte que les pôles soient alternés (fig. 55).

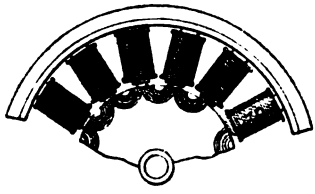


Fig. 55

Fig. 56

L'induit est formé de tôles minces, percées de trous pour la ventilation (fig. 56), placées sur l'arbre d'acier et maintenues par des boulons entre les plaques terminales. Les tôles ne sont pas isolées

Digitized by Google

entre elles par du papier ; elles sont simplement empilées, la rouille formant un isolant suffisant pour empêcher la formation des courants de Foucault.

Les bobines plates (fig. 57) sont enroulées sur un noyau en bois, la partie droite a juste la longueur du cylindre de l'armature et les deux parties courbes sont rabattues sur les deux bases de ce cylindre. Ces bobines, enroulées de fil à double gaine de coton verni, sont placées sur l'armature avec interposition d'amiante et de mica ; puis, le tout est recouvert d'un enroulement en fil de laiton, de sorte que, l'armature terminée a la forme d'un cylindre. Les extrémités des bobines rabattues sur les deux bases du cylindre sont maintenues par des plateaux de bronze. A l'une des extrémités est adapté un autre disque portant des bandes radiales, agissant comme un ventilateur en chassant l'air à travers les ouvertures ménagées dans l'armature, afin de la refroidir.

Fig. 57

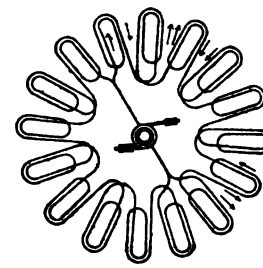


Fig. 58

Les liaisons entre les bobines sont indiquées sur la figure 58. Chacune des moitiés de l'armature comporte des bobines en tension, et ces deux parties, placées en quantité, aboutissent aux bagues de prise de courant.

Voici les données principales des alternateurs Westinghouse de l'usine de Sardinia street à Londres :

Puissance, 125 k. w. ; tension, 1050 v. ; nombre de tours par minute, 1030.

16 pôles inducteurs, 16 bobines induites. Ces dernières ont une longueur utile de 68,58 c. m. ; une largeur totale de 13,97 c. m. ; la largeur du vide intérieur est de 2,54 c. m. ; chacune de ces bobines a 13 spires.

Digitized by Google

Chaque bobine développe environ 125 v., ce qui fait à peu près 15 c. m. de fil par volt.

Le diamètre total de l'armature terminée est de 76, 2 c. m. Les 16 pôles inducteurs sont en acier fondu, ils ont une hauteur de 20, 32 c. m., une longueur de 68 c. m. dans le sens de l'axe et leur largeur est de 6,35 c. m.

A pleine charge, l'intensité du courant d'excitation est de 27 à 28 a.

La Société Westinghouse construit également des alternateurs autorégulateurs pour courant constant. L'induit est formé de plaques de tôle ayant la forme indiquée figure 59.

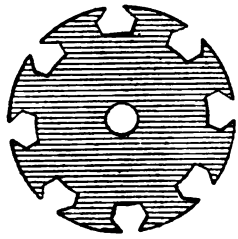


Fig. 59

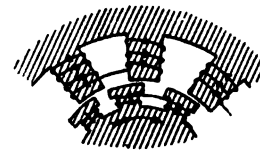


Fig. 60

L'extrémité des dents des bobines de l'armature est plus large que les pièces polaires (fig. 60).

La proportion des enroulements de l'armature et de l'inducteur est telle qu'au moment où l'intensité du courant dans l'armature est maximum, le nombre d'ampères-tours y est égal au nombre d'ampères-tours du champ; de sorte que si au moment où les dents de l'armature et celles du champ arrivent presque en coïncidence, l'intensité du courant induit est maximum, la f. e. m. développée est très faible.

Comme les dents de l'armature sont plus larges que les pôles, au moment de l'approche, la s.i. augmente considérablement, la réaction d'armature est très grande, et la machine est autorégulatrice pour courant constant.

§ 9. — ALTERNATEURS A INDUCTEURS ET INDUIT FIXES

Dans ces alternateurs que les anglais appellent *alternateurs à inducteurs*, la variation du flux magnétique dans les bobines induites

Digitized by Google

est obtenue en faisant varier la résistance des champs magnétiques.

M. E. Boistel, dans son adaptation de l'ouvrage de Silvanus Thomson, sur les machines dynamo-électriques, les appelle « *alternateurs à résistance magnétique variable* ou à *fer tournant.* » Désignations beaucoup plus caractéristiques que celle d'alternateur à inducteur.

Un grand nombre d'Ingénieurs et de Constructeurs, entre autres, MM. Mordey, Elihu Thomson, Kennedy, etc., ont construit des alternateurs à résistance magnétique variable.

Nous étudierons trois types de ces alternateurs dus : 1° à M. Helmer de la maison Cail; 2° à M. Kingdon (qui est le premier en date); 3° à M. Thury de la Société l'Industrie électrique.

Alternateur Cail-Helmer. — La maison Cail appelle cet alternateur *alternateur à flux ondulé.* Ainsi que l'indique le schéma de la figure 61, qui représente un alternateur à quatre pôles, les pièces polaires sont placées radialement à l'intérieur d'un anneau.

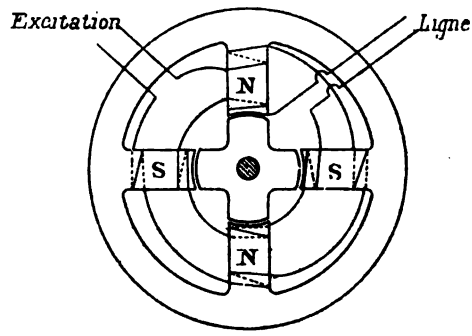


Fig. 61

Les enroulements inducteur et induit sont placés sur les pièces polaires. L'enroulement inducteur est placé tout près de la culasses et disposé de manière à produire des pôles alternés. L'enroulement induit est placé à l'extrémité intérieure des pièces polaires, aussi rapproché que possible du fer tournant, qui a la forme indiquée sur la figure. Quand le fer occupe la position indiquée sur le schéma la résistance magnétique est minimum, le flux magnétique est maximum. Quand le fer a tourné de 45° le flux magnétique est minimum. La figure 62 représente un petit alternateur d'essai de 1.200 watts, 1.800 tours à la minute.

Le travail dépensé dans les inducteurs est très élevé, 12 %, cela provient de ce que la différence de résistance magnétique est très faible. L'induction maximum dans le fer est de 6.200 unités C. G. S. La figure 62, donne le tracé de la courbe théorique de la f. e. m., en supposant qu'il n'y a pas dispersion des lignes de force et pas de s. i.

Digitized by Google

Quand le milieu O de la dent passe de O en O', le flux qui traverse la bobine A, diminue.

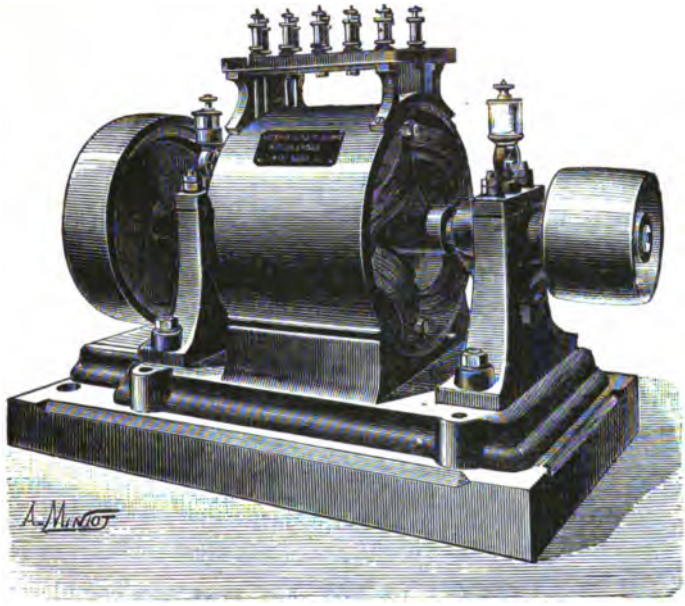


Fig. 62

Quand O est en O' le flux est minimum, puis il commence à aug-

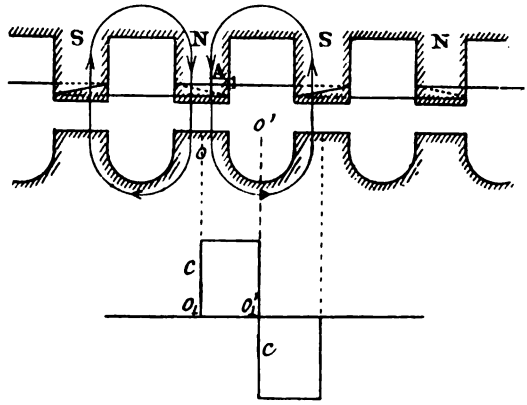


Fig. 63

menter. La courbe a donc théoriquement la forme indiquée en *c*. S $2p$ est le nombre de pôles, on a :

$$F = \frac{1}{T} = \frac{2p\,N}{60}$$

Digitized by Google

N étant le nombre de tours du fer par minute. Si Φ est la différence entre le flux magnétique traversant la bobine A, quand le milieu de la dent est en O ou en O', la f.e.m. moyenne induite dans une spire, est :

$$e'_m = \frac{\Phi}{\frac{T}{2}} = \frac{2\,\Phi}{T} = 4\,\Phi\,p\,\frac{N}{60}$$

Comme K = 2 (voir page 4) s'il y a n_1 spires par bobine, la f.e.m. efficace pour les $2p$ bobines en tension, sera exprimée en volts par la relation :

$$e_{eff} = 8\,\Phi\,p^2\,n_1\,\frac{N}{60}\,10^{-8}.$$

Alternateur Kingdon — Les bobines inductrices et induites à noyaux feuilletés, sont disposées radialement à l'intérieur d'un anneau.

Les bobines sont alternées, de sorte qu'une bobine induite se trouve placée entre deux bobines inductrices enroulées en sens inverses et réciproquement, une bobine inductrice est placée entre deux bobines induites enroulées en sens inverses.

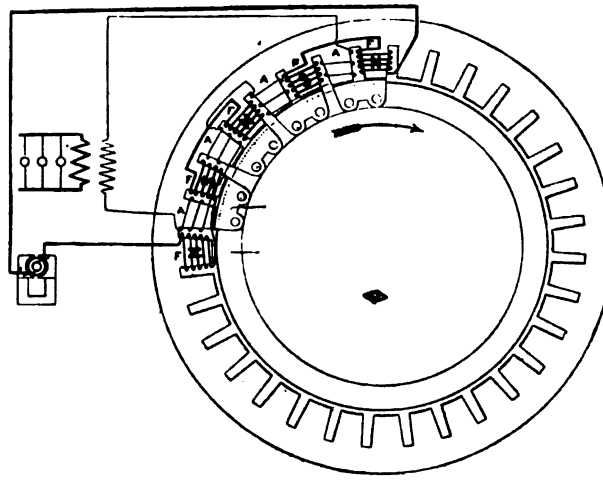


Fig. 64

A l'intérieur de l'anneau, tourne une roue en bronze (fig. 64) portant à sa partie extérieure des pièces en tôle feuilletée, en nombre

Digitized by Google

égal à celui des bobines inductrices. Chacune de ces pièces a une largeur telle, qu'elle embrasse exactement une bobine induite et une bobine inductrice juxtaposées. Quand la roue tourne, il y a changement de polarité dans les noyaux des bobines induites et production, par conséquent, d'une f.e.m. alternative.

La maison Woodhouse et Rawson, de Londres, avait exposé à Francfort, en 1891, un alternateur Kingdon de 75 k. w. ayant 16 bobines induites et 16 bobines inductrices. Les 16 bobines induites étaient divisées en quatre séries de quatre, la tension était de 110 volts à 350 tours par minute, la fréquence était, comme nous le verrons plus loin $F = \frac{16 \times 350}{60} = 60$.

Tracé de la courbe théorique de la f. e. m. et calcul de la fréquence.

Supposons l'anneau développé (fig. 65) *ba* étant une des pièces de fer de l'anneau, A_1 et A_2 deux bobines induites (enroulées en sens inverses).

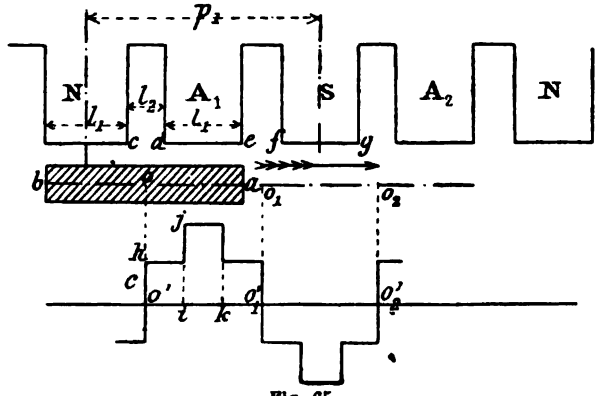


Fig. 65

La largeur l_1 d'une bobine induite étant égale à la largeur d'une pièce polaire et l_2 étant la largeur de l'espace vide entre deux bobines consécutives, si p_1 est le pas de l'alternateur, on a :

$$p_1 = 2\ (l_1 + l_2).$$

Quand la pièce de fer est dans la position indiquée sur la figure, la f.e.m. est *o*. Pendant le temps que *a* vient en *f*, le flux diminue dans la bobine A_1 et la f. e. m. induite est constante. Quand *a* a atteint *f* et *b* n'a pas encore atteint *c*, le noyau de la bobine A_1 est parcouru par

Digitized by Google

deux flux de sens inverses, dont l'un diminue et l'autre augmente, la f. e. m. est constante et a une valeur double de la précédente,

Quand b a dépassé c, le noyau de la bobine n'est plus parcouru que par un flux provenant de S, qui augmente régulièrement, la f. e. m. induite est alors égale à celle qui était créée quand le centre de la pièce de fer se déplaçait a partir de o.

Quand le milieu de la pièce de fer est en o_1 (a est en g) la f. e. m. change brusquement de sens.

La courbe c représente donc la courbe de la f. e. m. Naturellement la s. i. et la dispersion des flux magnétiques, etc., ont pour influence d'arrondir les angles de cette courbe.

Si $2p$ est le nombre de bobines inductrices (ou induites), N le nombre de tours de l'anneau par minute et F la fréquence, on a :

$$F = \frac{2p\,N}{60}$$

Si Φ représente la différence entre le flux total émanant d'un pôle quand la pièce de fer est dans la position indiquée sur le schéma, et le flux quand la pièce est enlevée, il est facile de voir que $o'h$ représente la f. e. m.

$$\frac{\Phi}{\frac{T}{2}} = \frac{2\Phi}{T} = 2\,\Phi\,F = 4\,B\,p\,\frac{N}{60}$$

et que ij représente une force électro-motrice double :

$$8\,\Phi\,p\,\frac{N}{60}.$$

On a :

$$o'\,o'_1 = \frac{p_1}{2} \qquad ik = l_1 - l_2.$$

La f. e. m. moyenne induite dans une spire sera donc :

$$e'_m = \frac{2}{p_1}\left\{\frac{p_1}{2}\,4\,\Phi\,p\,\frac{N}{60} + (l_1 - l_2)\,4\,\Phi\,p\,\frac{N}{60}\right\}$$

$$e'_m = 4\,\Phi\,p\,\frac{N}{60}\left\{1 + \frac{2\,(l_1 - l_2)}{p_1}\right\}$$

Si $l_2 = l_1$, le second terme disparaît, il est facile de voir que la

Digitized by Google

courbe alors se compose d'une série de rectangles placés alternativement au-dessus et au-dessous de l'axe.

Il est facile de déterminer K (voir page 3) pour chaque cas.

On a donc comme f. e. m. eff. en volts, par spire induite :

$$e'_{eff} = 2K\,\Phi p\,\frac{N}{60}\left\{1 + 2\,\frac{l_1 - l_2}{p_1}\right\}\,10^{-8}.$$

Pour n spires en tension, $n = m_1\,n_1$, m_1 étant le nombre de bobines en tension et n_1 le nombre de spires d'une bobine, on a :

$$e_{eff} = 2K\,\Phi pn\,\frac{N}{60}\left\{1 + \frac{2\,l_1 - l_2}{p_1}\right\}\,10^{-8}.$$

Alternateur Thury (fig. 66-67).

L'alternateur est constitué par un aimant fixe à enroulement inducteur unique, en forme d'anneau.

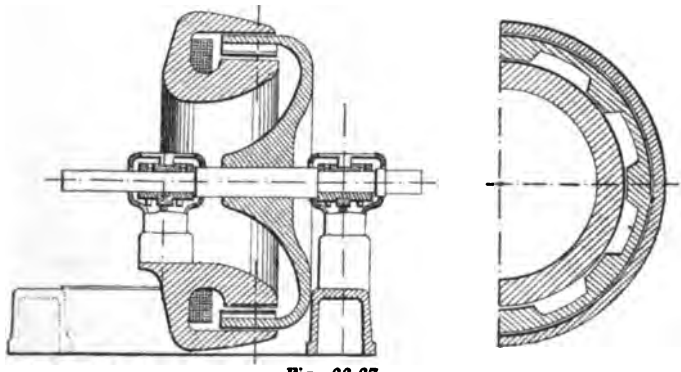


Fig. 66-67

L'enroulement inducteur, composé de deux ou trois bobines excitatrices, formées de rubans de cuivre, laissant entre elles un certain espace pour la ventilation, est placé comme l'indique la figure au fond du creux de l'anneau fixe, qui a la forme d'un C allongé.

Une partie mobile en forme de cloche, est clavetée sur un arbre porté par deux paliers, l'un fixé au bâti, l'autre à la culasse de l'anneau fixe. L'axe de l'arbre coïncide avec l'axe de révolution de l'anneau ou aimant.

La surface extérieure de la cloche est lisse, tandis que la partie

Digitized by Google

interne, qui se trouve entre les lèvres du creux de l'aimant, porte un certain nombre de saillies analogues à des dents d'engrenage.

L'enroulement induit formé de bobines plates est fixé au moyen de bandes sur la lèvre inférieure de l'ouverture en forme de C.

Les lignes magnétiques traversant la culasse pénètrent dans la cloche par la partie extérieure lisse pour se répartir entre les dents et rentrer dans la culasse en coupant l'enroulement induit. La cloche, par sa rotation, produit donc dans l'entrefer une variation du flux magnétique, qui engendre dans l'induit une f. e. m. alternative.

Au moyen de cliquets appropriés, on peut faire glisser l'aimant sur le bâti, dans le sens de son axe, pour examiner les enroulements induits et inducteur.

Des mesures et essais effectués à Turin (station centrale de la Société piémontaise d'électricité) sur deux alternateurs Thury de 400 chevaux, ont montré :

1° Que l'excitation prend moins de 0,5 %.

2° Que le rendement commercial est de 93 à 94 % et le rendement électrique de 97 %;

3° Que ces alternateurs se couplent très facilement en parallèle, malgré les conditions les plus défavorables;

4° Qu'ils se maintiennent en synchronisme, malgré de fortes différences de débit.

Tracé de la courbe théorique de la f. e. m. et calcul de la fréquence.

Les parties hachurées (fig. 68) indiquent les épaisseurs des en-

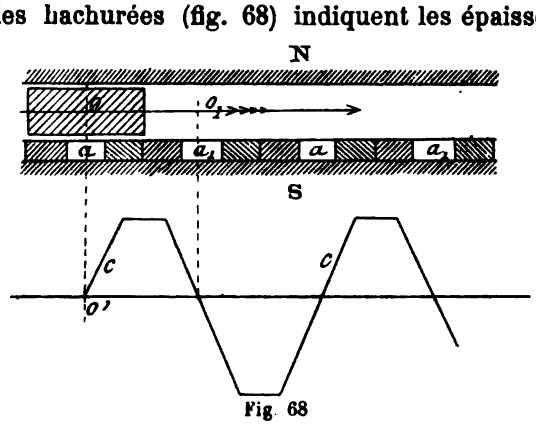


Fig. 68

roulements des bobines induites a, a_1, qui sont inversés, les dents ayant la même largeur que les bobines.

Digitized by Google

Il est facile de voir que la courbe, si on ne considère ni la s. i., ni les dérivations du flux magnétique, a la forme indiquée en *c*.

Si Φ, est le flux magnétique total traversant une dent, la variation totale du flux dans une demi-période est B.

La f. e. m. moyenne induite dans une spire est :

$$e'_m = \frac{\Phi}{\frac{T}{2}} = \frac{2\Phi}{T} = 2\Phi F$$

Or si d est le nombre de dents, la fréquence est :

$$F = \frac{d N}{60}$$

On a donc :

$$e'_m = 2\Phi d \frac{N}{60}$$

Si n est le nombre total des spires en tension, la f. e. m. moyenne exprimée en volts sera :

$$e_m = 2\Phi d n \frac{N}{60} 10^{-8}$$

D'après la forme de la courbe, on pourra calculer K (voir page 7), et on aura :

$$e_{eff} = K\Phi d n \frac{N}{60} 10^{-8}$$

§ 10. — ALTERNATEURS A COURANTS POLYPHASÉS

Dans un alternateur à courants polyphasés, l'induit, lorsque les circuits sont également chargés et que les courbes des courants sont exactement des sinusoïdes, donne naissance à un champ tournant avec une vitesse contraire et égale à celle de l'induit quand celui-ci est mobile, de sorte qu'en réalité ce champ est fixe dans l'espace et ne donne pas naissance à des courants de Foucault dans les pièces polaires, qui n'ont pas besoin d'être feuilletées. Quand l'induit est fixe, le champ tourne dans l'espace dans le même sens et avec la même vitesse que l'inducteur, de sorte qu'il est encore immobile par

Digitized by Google

rapport à ce dernier. C'est pour cela que les alternateurs polyphasés ne font pas entendre un ronflement comme les monophasés, ou du moins un ronflement très faible.

Le moyen le plus simple pour obtenir deux courants biphasés est de monter sur le même arbre deux alternateurs, en les calant avec un écart angulaire d'un demi-intervalle de pôle.

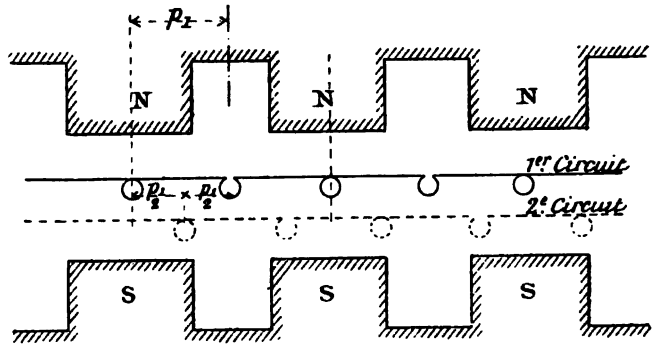


Fig. 69

Le dispositif revient plus cher qu'un alternateur unique donnant le courant biphasé, mais, par contre, il est facile de régler la f. e. m. en faisant varier l'excitation de chaque alternateur, ce que l'on ne peut faire avec un champ inducteur unique.

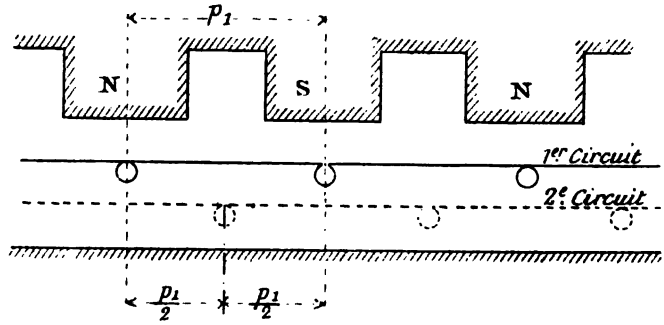


Fig. 70

Ce système a été employé par la Société du Creusot, concessionnaire pour la France des brevets Ganz, dans un transport de force par courants biphasés aux mines de Décize.

On pourrait de même obtenir des courants triphasés au moyen de trois alternateurs simples montés sur un arbre commun.

Les figures 69 et 70 montrent comment on doit disposer les bo-

Digitized by Google

bines, dans le cas d'un alternateur biphasé; ces bobines peuvent être ou placées à côté les unes des autres, ou au-dessus les unes des autres, dans chaque cas, la constante K (voir page 3) variera.

La figure 71 indique les positions relatives de bobines dans le cas

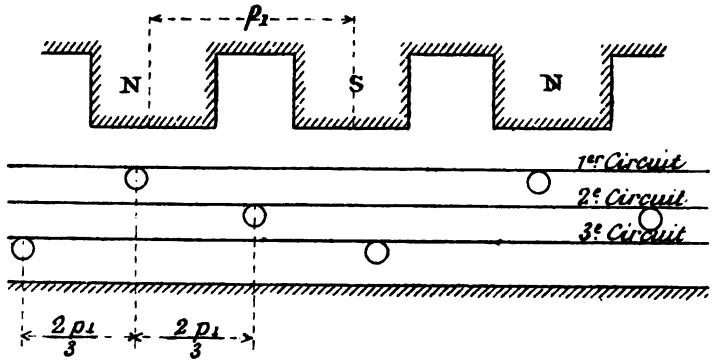


Fig. 71

d'un alternateur triphasé. Dans le cas où l'on veut placer les bobines à côté les unes des autres, on emploiera dans chaque circuit juste autant de bobines que de champs. Si l'on place les bobines les unes au-dessus des autres, on pourra dans chaque circuit doubler le nombre des bobines (en inversant l'enroulement des bobines adjacentes, dans chaque circuit).

Les figures 72, 73, 74 et 75 indiquent le système de montage des induits à barres, pour des courants bi et triphasés; si l'on veut dans

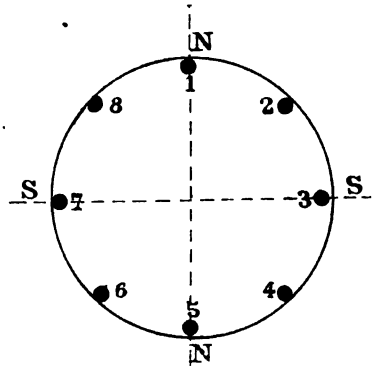


Fig. 72

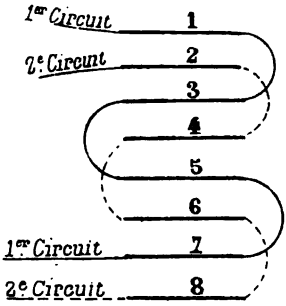


Fig. 73

chaque circuit placer plusieurs barres adjacentes, on pourra les re-

Digitized by Google

lier, soit comme l'indique la figure 9 (page 7), soit comme l'indique la figure 10 (page 7).

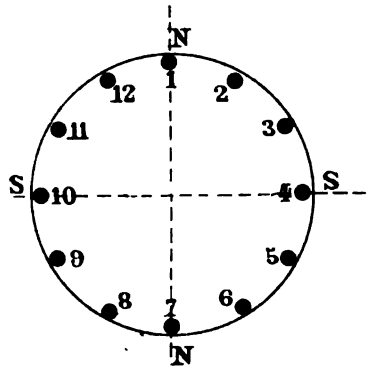


Fig. 74

Les alternateurs polyphasés peuvent être rendus autorégulateurs, de potentiel en un point donné d'un réseau, même pour des charges inductives.

M. Thomson-Houston (') emploie dans ce but la disposition suivante :

La dynamo excitatrice est actionnée par un moteur à champ tournant, monté en dérivation sur les circuits de l'alternateur.

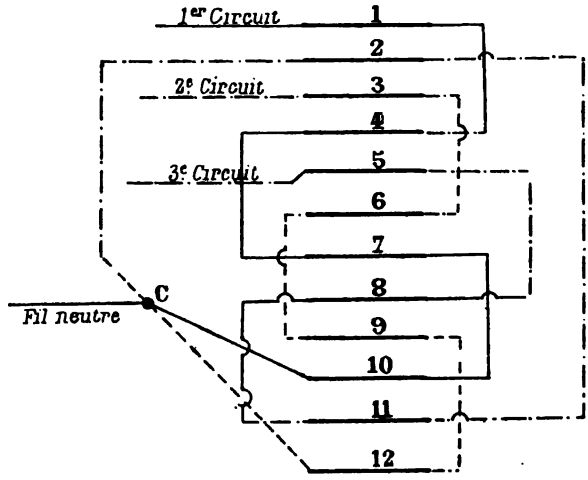


Fig. 75

Des bobines de s. i. sont intercalées dans les circuits (fig. 76), elles possèdent deux enroulements en sens inverses *d* et *e*; l'enroulement *d* est parcouru par le courant de ligne, et l'enroulement *e* par le courant allant au moteur.

A mesure que l'intensité augmente dans les circuits extérieurs, l'impédance des circuits dérivés alimentant le moteur diminue. Il en résulte que la puissance fournie au moteur augmente, de sorte que l'intensité du courant d'excitation et par conséquent la différence de

(1) D'après un article de M. G. Roux, paru dans l'*Industrie électrique*, du 10 avril 1894.

Digitized by Google

potentiel aux bornes de l'alternateur augmentent et que l'on peut maintenir un voltage constant, en un point donné du réseau.

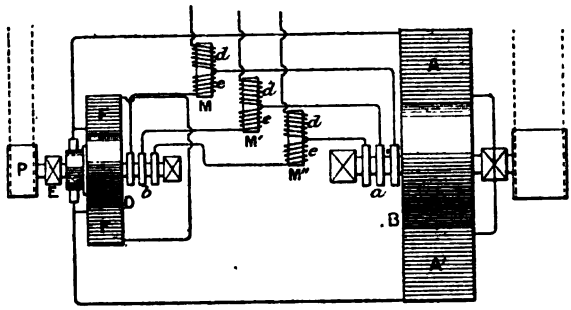


Fig. 76

Une courroie P permet d'actionner la dynamo à la mise en marche et de lancer le moteur.

La courbe supérieure de la figure 77 montre les résultats obtenus pour un alternateur triphasé, la différence de potentiel aux bornes à

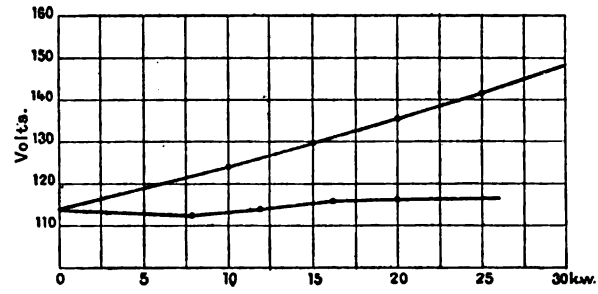


Fig. 77

vide est de 114 volts et de 148 volts à pleine charge. La courbe inférieure donne le voltage aux bornes de l'alternateur, sans emploi de l'appareil compensateur pour des charges non inductives.

Alternateur Brown. — Ces alternateurs sont construits par la Société des établissements Wehyer et Richemond, de Pantin, concessionnaires des brevets Brown.

L'inducteur est formé d'un anneau en fonte silicée portant à l'intérieur les pôles terminés par des pièces rectangulaires (fig. 78 et 79).

L'induit est formé d'un anneau en tôles de fer, isolées les unes des autres, à la surface duquel sont posées les bobines induites plates qui sont fixées au moyen d'un enroulement de fil de laiton.

Digitized by Google

Fig. 79

Fig. 78

Digitized by Google

Les bobines des divers circuits sont superposées; ainsi, dans un alternateur biphasé les bobines du premier circuit sont posées directement sur l'induit avec interposition du papier isolant, celles du deuxième circuit sont posées par-dessus, naturellement en les faisant chevaucher sur les premières, elles sont également isolées au papier et l'ensemble est maintenu par du fil de laiton (fig. 80).

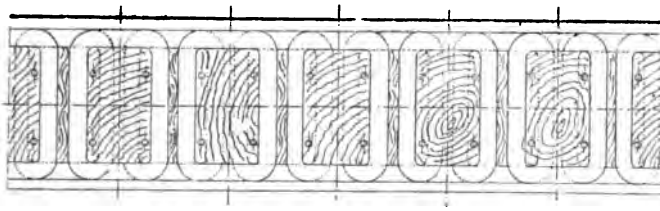


Fig. 80

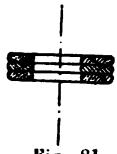


Fig. 81

Les bobines sont enroulées avec du fil isolé au coton de section en ovale allongée, le grand axe étant place dans le plan de la bobine. Il n'y a qu'une épaisseur de fil dans le sens du plan de la bobine, comme l'indique la figure 81, qui donne la coupe d'une bobine suivant l'axe.

La Société Wehyer et Richemond construit également des alternateurs monophasés du même type.

Dans ce cas, on place deux bobines dont les sens d'enroulement sont inversés, au-dessus l'une de l'autre, de sorte qu'il suffit de relier extérieurement les bobines adjacentes entre elles, comme l'indique le schéma de la figure 82; les bobines telles que B étant superposées aux bobines A.

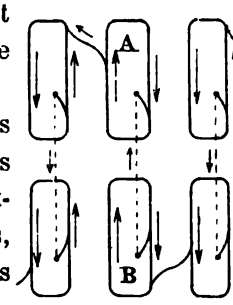


Fig. 82

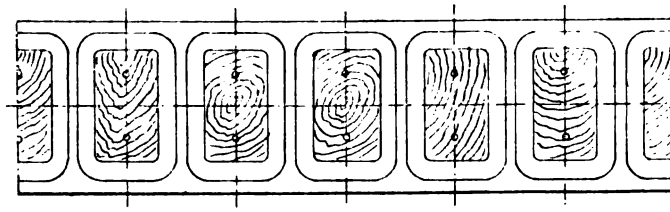


Fig. 83

Après montage des bobines, l'induit est représenté figure 83.

Digitized by Google

Les figures 84 et 85 donnent les schémas des connexions des bobines avec les bagues collectrices, pour le cas d'un alternateur biphasé et pour le cas d'un alternateur monophasé.

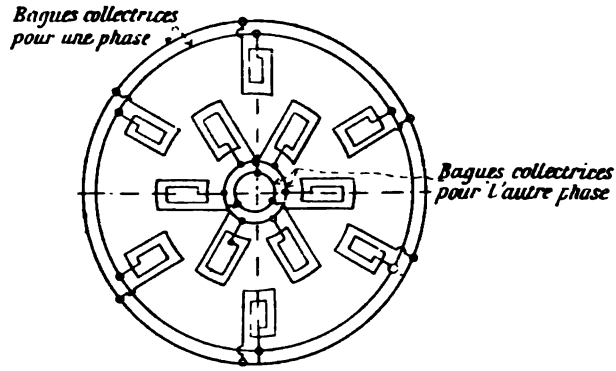


Fig. 84

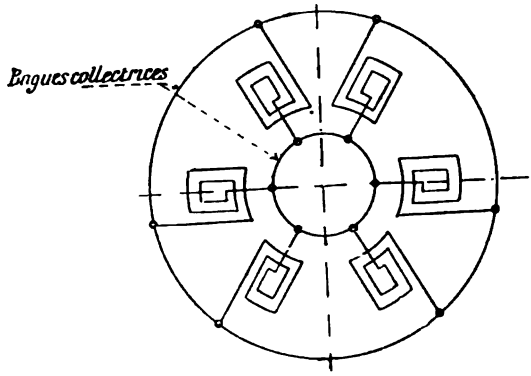


Fig. 85

Les figures 86 et 87 représentent un alternateur volant du même système dans lequel l'induit est fixe et l'inducteur mobile.

M. Boucherot, ingénieur de la Société Wehyer et Richemond, a mesuré les diverses pertes dans un alternateur biphasé de 75 k. w. à 8 pôles, faisant 600 tours à la minute $\left(F = \frac{4 \times 600}{60} = 40\right)$ donnant dans chaque circuit 150 volts et 165 ampères.

Il a pu employer, comme pour les dynamos à courant continu, la méthode consistant à mesurer d'une part l'intensité du courant continu nécessaire pour obtenir à pleine charge le voltage normal; d'autre part, la résistance des circuits de l'induit à chaud, et finale-

Digitized by Google

ment le travail absorbé par la machine tournant à la même vitesse et dans le même champ que celui donnant à vide le voltage normal, augmenté de la perte de charge (RI) dans l'induit à pleine charge.

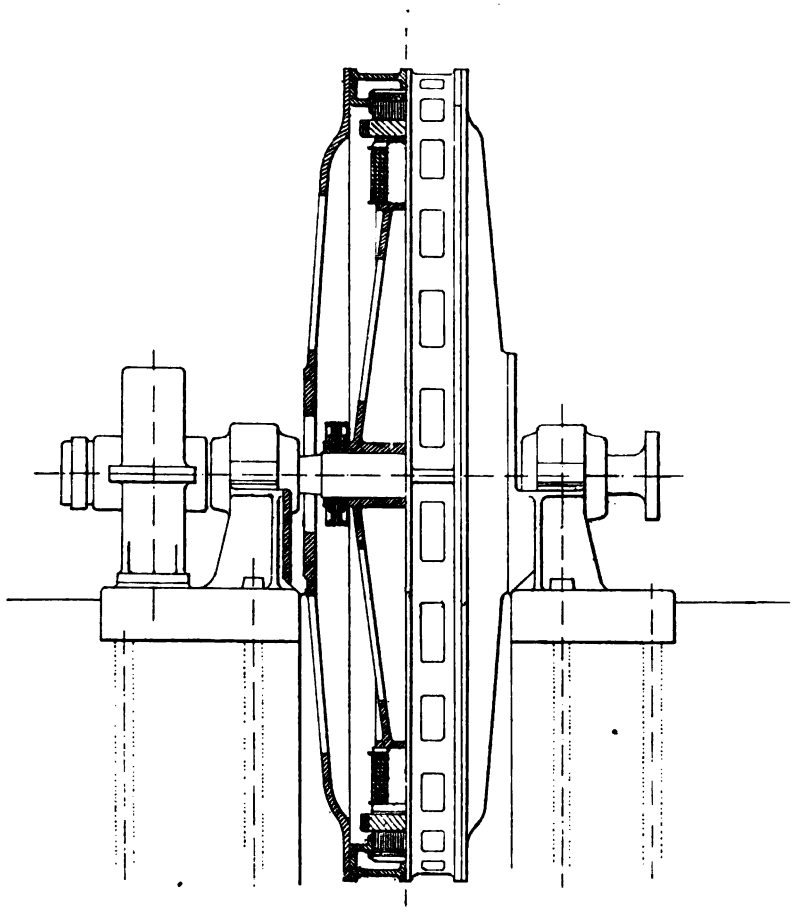


Fig. 86

Ce travail se compose des pertes par frottement, par la résistance de l'air, par hystérésis, par courants de Foucault et par courants internes.

En faisant varier la vitesse, il a pu par le calcul des couples, déterminer et séparer les pertes par hystérésis (proportionnelles à la vitesse) et les pertes par courants de Foucault et internes (proportionnelles au carré de la vitesse).

Digitized by Google

Ce procédé est parfaitement justifié, car, comme nous l'avons vu au commencement de ce paragraphe, il n'y a pas de courants de Foucault dans les pièces polaires, puisque le champ induit est fixe dans l'espace.

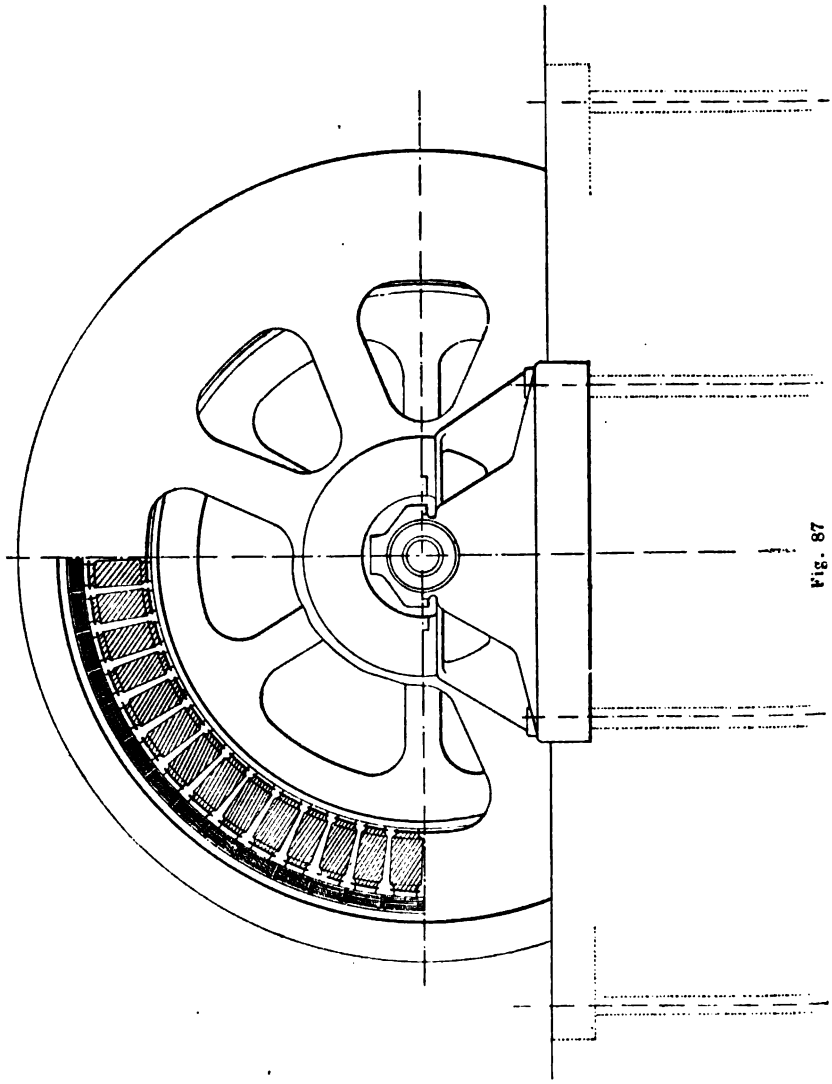


Fig. 87

Dans un alternateur monophasé, l'emploi de cette méthode serait moins justifié, car on ne tiendrait pas ainsi compte des pertes par courants de Foucault, dues à ce que le champ induit n'est plus fixe,

Digitized by Google

mais bien alternatif. Cependant en pratique, quand les pièces polaires sont feuilletées, la méthode peut être employée sans erreur appréciable, même pour un alternateur monophasé.

Les résultats obtenus par M. Boucherot, sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

	A pleine charge	A demi-charge	Au dixième de la charge
Perte dans l'induit.	1.700	420	20
Perte dans les inducteurs. . . .	1.370	1.250	1.160
Frottements	540	540	540
Hystéresis	390	380	370
Courants de Foucault	1.550	1.500	1.460
Puissance utile.	5.000	25.000	5.000
Puissance totale	5.550	29.090	8.550
Rendement.	0,90	0,86	0,58

Alternateur de la Société de Fives-Lille. — La Société de Fives-Lille qui exploite en France les brevets de « l'Allgemeine elektricitæts Gesellschaft », construit des alternateurs polyphasés du type indiqué sur les figures 88 et 89.

L'inducteur en tôle laminée, a la forme d'un anneau, il est fixé au bâti et porte à la partie interne les pièces polaires également en tôle.

L'induit, constitué par un cylindre en tôle, est muni d'un enroulement à barres. Dans les alternateurs à courants triphasés, une des extrémités de chacun des enroulements aboutit à une fourche, les autres extrémités des trois circuits sont reliées à une quatrième fourche. Ces fourches communiquent avec des bagues collectrices et les courants sont recueillis au moyen de balais. Le conducteur, relié au centre de l'étoile, peut être mis soit à la terre, soit être relié au quatrième fil des circuits.

Les données de l'alternateur triphasé, représenté sur les figures 11 et 12, sont les suivantes :

Digitized by Google

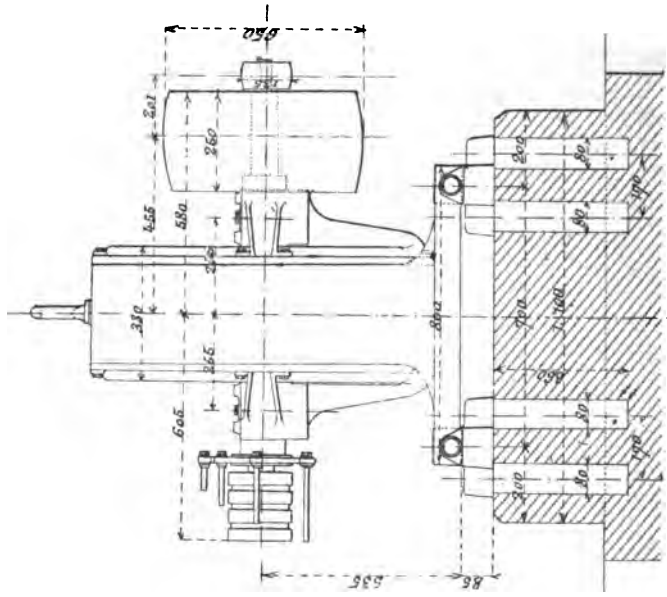


Fig. 89

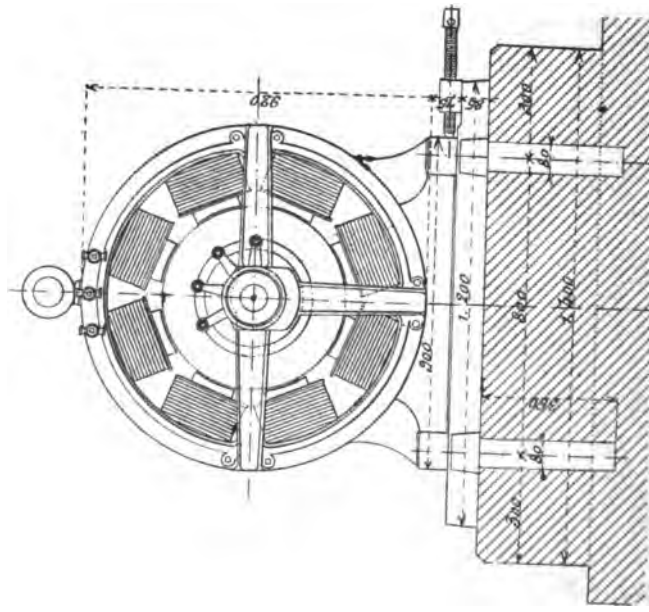


Fig. 88

Digitized by Google

Tension entre deux conducteurs.	120 volts.
(soit $\frac{120}{\sqrt{3}} = 70$ v. environ entre un conducteur et le centre de l'étoile, voir chapitre V).	
Intensité dans chaque circuit	170 a.
Puissance en watts	33.000
Nombre de tours	750
Fréquence. $\left(F = \frac{4 \times 750}{60} = 50\right)$.	
Courant d'excitation	100 v. 7 a.
Puissance absorbée	50 chevaux.

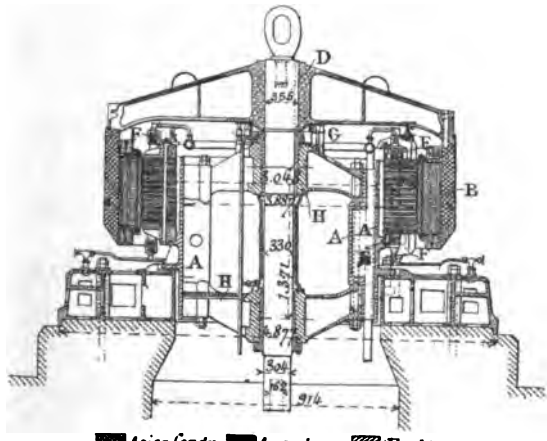
Alternateur biphasé Forbes pour l'utilisation des chutes du Niagara.

Ces alternateurs, de 5.000 chevaux, devant fournir un courant d'une tension efficace de 2.000 volts sont en construction dans les ateliers de la Compagnie Westinghouse, à Pittsburgh. Ils seront commandés directement par des turbines horizontales du système Faesch et Picard, de Genève.

Le nombre de tours a été fixé à 250 à la minute, l'induction mobile aura 8 pôles, ainsi que chacun des circuits de l'armature fixe.

La fréquence du courant sera donc $F = \frac{4 \times 250}{60} = 16{,}67$.

L'anneau de l'inducteur, constitué par un cylindre vertical B



Acier fondu Acier doux Fonte
Fer forgé Bronze

Fig. 90

(fig. 90 et 91) (1) en acier fondu sera relié par 16 boulons à une sorte de chapeau à 8 bras D, fixé au sommet de l'arbre de la turbine.

A l'intérieur de l'anneau, seront fixés au moyen de boulons, les

1. Ces figures sont extraites de l'*élektrotechnische Zeitschrift* du 3 mai 1894.

Digitized by Google

huit pôles inducteurs portant chacun deux bobines, formées de bandes de cuivre entre lesquelles un courant d'air pourra circuler.

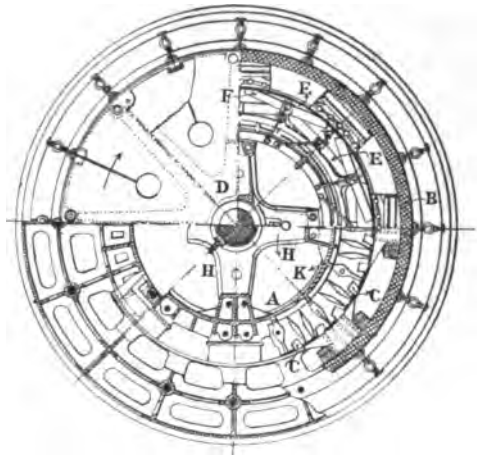


Fig. 91

Le courant inducteur sera amené aux bobines par l'intermédiaire de deux balais fixes G, frottant sur deux bagues adaptées à la partie inférieure du chapeau.

Un cylindre en fonte A, porté par le bâti général auquel il sera relié par des boulons, supportera l'armature, ainsi que les deux paliers de l'arbre de la turbine.

Les paliers seront à circulation d'huile et un couple thermo-électrique, actionnera un relais, quand la température des paliers s'élévera, de sorte que le mécanicien pourra envoyer de l'eau pour les refroidir, par une conduite aménagée à cet effet.

Le noyau de l'armature en tôles minces, dans lesquelles seront aménagées des ouvertures pour la circulation de l'air, sera placé entre deux couronnes de bronze.

Il sera maintenu par des rainures verticales venues de fonte avec le cylindre A et fixé à une rainure horizontale de ce cylindre, par 16 boulons en acier nickelé. Cet acier, contenant environ 25 % de nickel a une grande résistance magnétique.

Les bobines de l'armature comporteront 72 spires en fil de cuivre n° 0 de la jauge Brown Scharp (8,225 m. m. de diamètre). Ces spires seront isolées au mica et elles seront enfermées dans des conduites où pourra circuler de l'huile. Ces conduites seront en substance isolante

Digitized by Google

inattaquable par l'huile et la chaleur (une épaisseur de 3 m. m. résiste à 30.000 v). Les bobines seront placées dans des rainures ménagées à cette effet à la périphérie de l'armature (fig, 91). Ces rainures, pour faciliter la pose et l'enlèvement des bobines ne seront pas entaillées dans le sens des rayons, mais bien parallèlement deux à deux. Les bobines F de l'un des enroulements seront plates, les extrémités des bobines E de l'autre enroulement seront rabattues en haut et en bas de l'armature.

L'huile d'un réservoir, placé à une certaine hauteur dans la salle des machines, sera amenée par des conduites à la partie inférieure des bobines et repartira par la partie supérieure d'où des tuyaux l'amèneront à une conduite générale (fig. 92). Sur cette conduite générale sera aménagée une ouverture munie d'une vitre permettant de surveiller l'écoulement.

L'huile sera ramenée à un refroidisseur à eau, et envoyée ensuite par des pompes au réservoir supérieur, de sorte que la circulation sera continue.

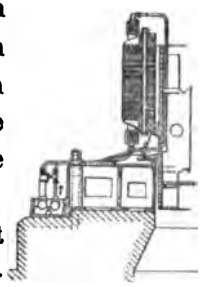


Fig. 92

Alternateur Haselwander. — M. Haselwander, d'Offenbourg, a construit, en 1887, un alternateur à courants triphasés. Ce fut la première machine construite spécialement dans le but d'obtenir des courants polyphasés destinés à produire un champ tournant. Cet alternateur a été exposé en 1891, à Francfort.

L'armature constituée par un anneau en fil de fer, de 400 m. m. de diamètre, 180 m. m. de largeur et 30 m. m. d'épaisseur, est munie d'un enroulement Gramme, formant 12 bobines de 52 spires chacune, constituées par du fil de cuivre de 1,5 m. m. de diamètre.

Les extrémités des bobines sont amenées à des bornes placées sur une planchette; suivant le mode de connexion, on peut obtenir dans chaque phase, 50 v. et 48 a, 100 v. et 24 a., 200 v. et 12 a. pour 960 tours à la minute.

A l'intérieur de l'armature, tourne l'inducteur, à quatre pôles $\left(F = \frac{2 \times 960}{60} = 32\right)$; il est constitué par un dé monté sur l'arbre, sur les quatre faces duquel sont rapportés les noyaux cylindriques d'électro-aimants de 80 m. m. de diamètre et de 80 m. m. de longueur. L'extrémité des pièces polaires est épanouie.

Digitized by Google

Alternateurs de la Société d'Oerlikon.

1° *Alternateurs pour courants à basse tension.* — L'alternateur triphasé de 300 chevaux, pour le transport de puissance de Lauffen-Francfort, en 1891, était de ce type.

La tension entre un des circuits et le centre de l'étoile (mis à la terre) était de 55 volts (la tension entre deux conducteurs était donc de $55\sqrt{3} = 95{,}26$ v. voir chapitre V).

Le champ inducteur tournant est constitué de la manière suivante : sur la surface extérieure d'un plateau en fonte (dont le plan médian coïncide avec celui de l'armature) est aménagé un canal annulaire de 18 c. m. de profondeur (fig. 93 et 94). Dans ce canal est placé l'en-

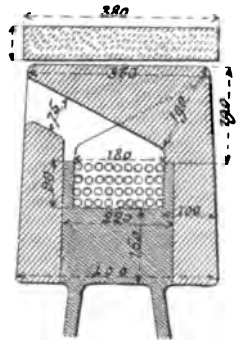


Fig. 93

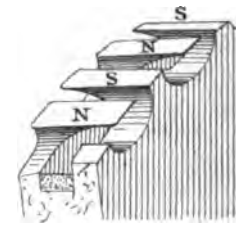


Fig. 94

roulement inducteur formé de 496 spires de fil de cuivre de 5 m. m. de diamètre, la longueur moyenne d'une spire étant de 4,03 m. Le poids total de la masse de cuivre de l'inducteur est de 424 kilogrammes.

Sur les deux faces pleines du plateau en fonte sont rapportés des anneaux d'acier doux de 10 c. m. d'épaisseur portant à la partie extérieure chacune 16 pièces polaires de 36 c. m. de longueur et de 13 c. m. de largeur, dont la surface extérieure est à 6 m. m. de la partie intérieure lisse de l'armature. Les pièces polaires des deux anneaux sont alternées, celles de l'anneau de gauche étant dirigées vers la droite, celles de l'anneau de droite vers la gauche.

On a donc des pôles alternés.

L'armature fixe extérieure est formée d'un anneau composé de plaques de tôles, isolées au papier, d'environ 0,5 m. m. d'épaisseur.

Digitized by Google

Cet anneau a un diamètre extérieur de 189,4 c, m., un diamètre intérieur de 176,4 c. m. et une épaisseur suivant l'axe de 38 c. m. Tout près de la surface interne de l'induit sont percés parallèlement à l'axe 96 trous d'environ 33 m. m. de diamètre, dans lesquels sont introduites des barres de cuivre de 29 m. m. de diamètre, isolées de la masse du fer par des tubes d'amiante.

Ainsi que l'indique le croquis de la figure 95, les barres 1, 4, 7, 10... 96 — 95, 92, 89... 2. 93, 90, 87... 96. sont reliées en séries, formant trois lignes en zigzag, reliées en A_0 et mises à la terre par le conducteur neutre. Les autres extrémités A_1, A_2, A_3 aboutissent aux bornes de prise du courant. La résistance de chacun de ces enroulements est de 0.0007 ohms.

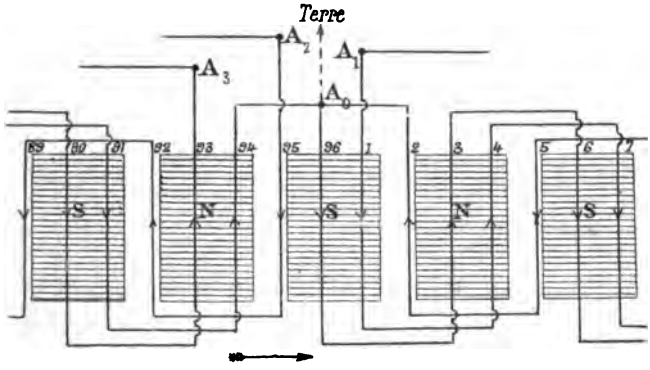


Fig. 95

L'entrefer, ou trajet des lignes de force dans l'air est de 6 m. m..

Essais de l'exposition de Francfort.

L'arbre d'une turbine faisant normalement 35 tours à la minute commandait par l'intermédiaire d'un engrenage l'arbre de l'alternateur faisant 155 tours. Le travail de la turbine avait préalablement été mesuré au frein, dans les diverses conditions de la chute et du vannage ; on avait ainsi pu établir des tables, de sorte, que pendant les expériences, on n'avait qu'à noter la hauteur de chute, l'état du vannage et la hauteur de la couronne inférieure, soit au-dessus soit au-dessous du niveau de l'eau à l'aval, pour connaître le travail fourni à l'alternateur.

Le travail fourni par l'alternateur était absorbé au moyen de

Digitized by Google

3000 lampes à incandescence, réparties uniformément entre les trois phases et montées en dérivation entre chacun des conducteurs et le conducteur neutre.

Les trois wattmètres étaient disposés, chacun entre un circuit et le centre de l'étoile.

On a procédé à dix-sept essais, à diverses charges et obtenu les résultats indiqués dans le tableau récapitulatif suivant : T_0 est le travail en chevaux fourni à la dynamo, T_t le travail mesuré avec les wattmètres, T_p le travail perdu, I, l'intensité efficace dans chaque phase, E, la f. e. m. efficace mesurée entre un circuit et le point neutre.

T_o	T_t	$T_p = T_o - T_t$	I	E	NOMBRE de tours
167,25	154,40	12,85	677	55,9	149,5
154,74	142,19	12,55	644	54,2	149,7
120,12	107,54	12,58	470	56,1	150,0
87,40	75,10	12,30	336	54,7	150,0

On voit que les pertes croissent sensiblement avec le travail de la dynamo.

Les circonstances n'ont pas permis de déterminer les pertes par hystérésis et courants de Foucault. La perte totale peut-être mise sous la forme

$$P_t = P_o + a\,T_t^2$$

en déterminant P_0 et a, par la méthode des plus petits carrés, on a

$$P_t = 12{,}54 + 0{,}000218\,T_t^2$$

Le tableau suivant des rendements a été déterminé, en employant pour calculer les pertes totales, la relation ci-dessus (on n'a pas tenu compte du travail d'excitation).

Digitized by Google

T_i	P_i	R^i	T_o	R^i
60	12,32	0,830	70	0,825
70	12,35	0,850	80	0,845
80	12,38	0,866	90	0,862
90	12,42	0,879	100	0,876
100	12,46	0,889	110	0,887
110	12,50	0,898	120	0,896
120	12,55	0,905	130	0,903
130	12,61	0,911	140	0,910
140	12,67	0,917	150	0,916
150	12,73	0,922	160	0,921
160	12,80	0,926	170	0,925
170	12,87	0,930	180	0,929
180	12,95	0,933	190	0,932
190	13,03	0,935	200	0,934

La puissance normale de la dynamo était de 300 chevaux pour 150 tours à la minute et 55 volts. Si on calcule le rendement pour ce travail, en employant la formule, on obtient 0,954.

2° *Alternateur pour courants à haute tension.*

Ainsi que l'indiquent les figures 96 et 97, l'inducteur est analogue à

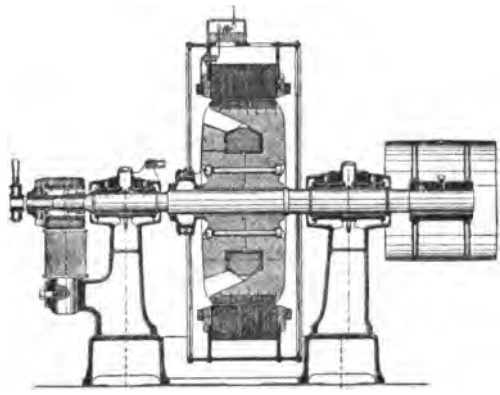


Fig. 96

celui précédemment décrit. Dans les petites machines telles que celle représentée figures 96 et 97, qui a 12 pôles, les deux anneaux en

Digitized by Google

acier doux, portant les pièces polaires, sont calés directement sur l'arbre, pour les grandes machines l'inducteur est formé de la même manière que celui précédemment décrit.

L'induit n'est pas constitué par des barres, mais par des bobines. Le corps de l'induit est formé d'un anneau feuilleté en tôle douce, recuites, isolées entre elles et il porte à la partie interne des rainures, dans lesquelles sont placées les bobines ; on obtient ainsi des sortes

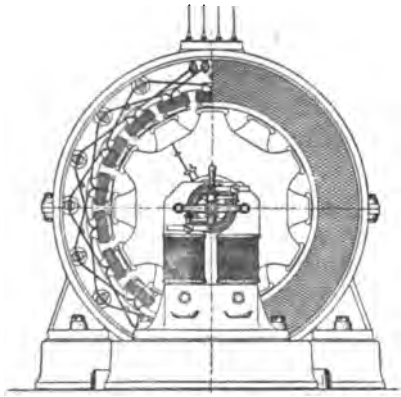


Fig. 97

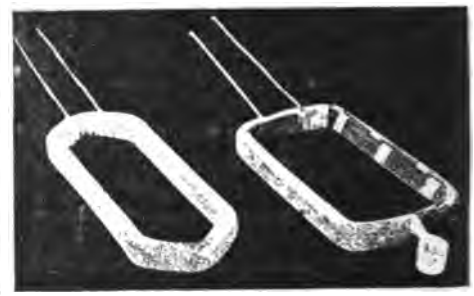


Fig. 98

de niches, que l'on tapisse de couches d'un papier spécial et de mica. Les bobines elles-mêmes (fig. 98), sont isolées, au moyen de plusieurs couches de coton, avec interposition continue de feuilles de mica. Ces bobines sont enroulées mécaniquement sur des gabarits, puis introduites dans les rainures pratiquées dans l'anneau de l'induit ; elles y sont fortement comprimées et assujetties avec des coins en matière isolante. Les dentelures de l'induit sont élargies du côté de l'axe, ce qui fait que la surface intérieure est presque continue et que le champ magnétique subit peu de variations. Le corps de l'induit, formé comme nous l'avons vu, de feuilles de tôle, est fortement comprimé dans l'enveloppe extérieure en fonte. La figure 99, donne la variation du voltage aux bornes, en fonction de l'intensité efficace du courant (à excitation constante) dans un des circuits d'un alternateur triphasé. La courbe de la f. e. m. est donnée figure 100. Ce type d'alternateur peut également servir pour le courant monophasé.

Digitized by Google

Alternateur Schuckert. — L'armature est constituée par un anneau aplati avec enroulement Gramme.

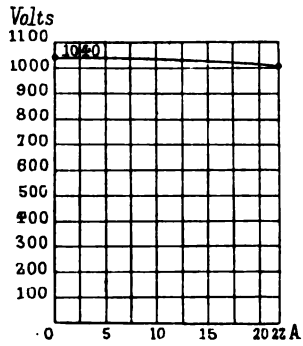


Fig. 99

Les électro-aimants (fig. 101) ont leurs axes perpendiculaires à ce plateau et forment deux couronnes placées de part et d'autre de l'induit, supportées par deux flasques en fonte. Les pôles en regard

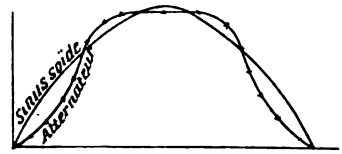


Fig. 100

dans les deux couronnes sont de même polarité, de sorte que les lignes de force se ferment à travers le plateau entre deux pôles consécutifs d'une même couronne et que les spires enroulées sur ce plateau se déplacent dans des champs de force alternés.

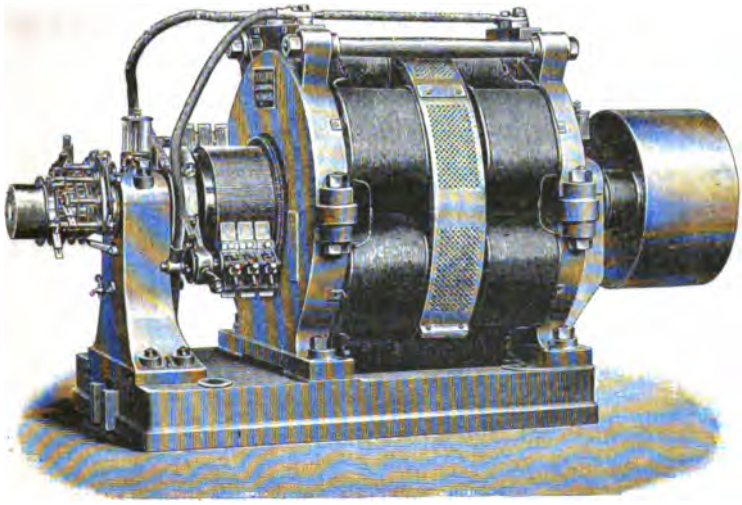


Fig. 101

Les noyaux des inducteurs sont en fonte et l'anneau est formé d'un ruban de fer feuillard isolé au papier, enroulé sur une rondelle de laiton.

Les extrémités des bobines sont ramenées à des bagues placées à

Digitized by Google

l'extrémité de l'arbre. Ces bagues peuvent être disposées de manière à recueillir, soit du courant biphasé, soit du courant triphasé suivant le système de montage.

On peut également, si on dispose en même temps d'un collecteur, obtenir du courant continu.

Une pareille machine, munie de bagues et d'un collecteur, peut servir :

1° De dynamo à courant continu ;

2° D'alternateur (au besoin auto-excitateur) à courant mono, bi ou triphasé ;

3° De moteur à courant continu ;

4° De transformateur de courant alternatif (mono ou polyphasé) en courant continu, la machine agissant comme moteur synchrone, et fournissant en même temps du courant continu au collecteur;

5° De transformateur de courant continu en courant alternatif, la machine fonctionnant comme moteur à courant continu, et fournissant en même temps du courant alternatif pris aux bagues.

Dans le cas où la machine est disposée pour fournir du courant biphasé, on est obligé d'employer deux circuits séparés, car sans cela, il y aurait court circuit dans l'armature.

Si l'on veut placer un fil commun, on est oblige d'avoir recours à un transformateur dans le secondaire duquel les deux circuits peuvent avoir un fil commun.

Actuellement, la maison Schuckert construit des alternateurs polyphasés avec pôles intérieurs (W. I.), et des alternateurs avec pôles extérieurs (W. A.). Les alternateurs avec pôles intérieurs sont construits d'après le type d'Oerlikon.

Pour les faibles voltages, l'armature comporte des barres noyées dans le fer, pour les voltages plus élevés, des bobines, également entourées complètement par le fer.

Le poids du cuivre dans ces machines est excessivement réduit; il est de 1 kilogramme pour 400 à 500 watts.

Dans les types de faible puissance, le voltage peut atteindre 3.000, et, dans les types de plus grande puissance, 5.000 volts.

Les alternateurs, avec pôles extérieurs (W. A.), sont construits de la façon suivante :

Les noyaux des bobines inductrices en acier fondu sont rapportés

Digitized by Google

à l'intérieur d'une sorte de culasse, fondue en deux parties ; la partie inférieure est fixée au bâti, la partie supérieure est reliée par des boulons à la partie inférieure.

L'armature est constituée par un tambour lisse en tôle feuilletée, et les bobines induites sont fixées à la périphérie au moyen d'un enroulement de fil.

Actuellement, la maison Schuckert ne construit que des alternateurs de faible puissance (au-dessous de 30 k. w.), d'après le système à pôles extérieurs.

Cependant, pour la station centrale de Budapest, les alternateurs biphasés avec pôles extérieurs sont de 100 k. w.

Les courbes de la figure 102 donnent le rendement commercial, les pertes dans l'induit et dans l'inducteur, d'un alternateur biphasé avec pôles extérieurs de 80 k. w.

Le voltage aux bornes est de 2.200 vots, l'intensité efficace est de 18,2 ampères par phase, le nombre de tours de 500 à la minute, et le nombre de pôles de 12 ; la fréquence est 50.

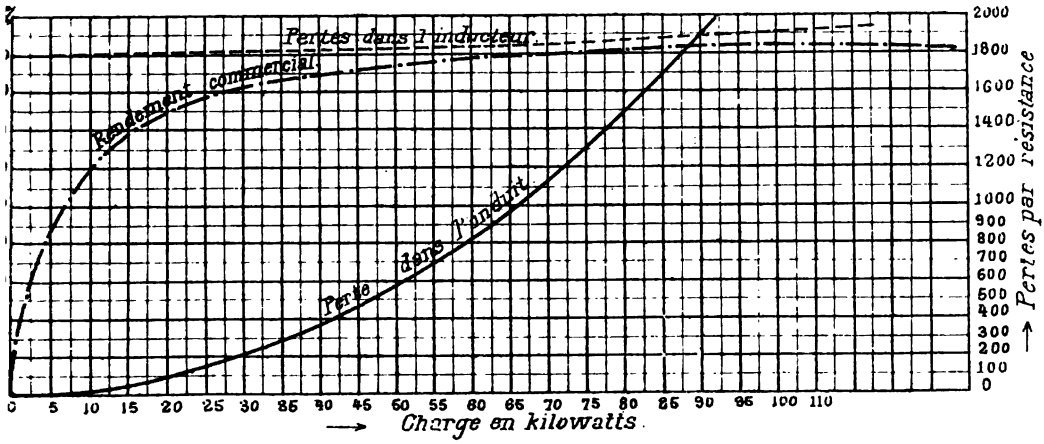


Fig. 102

La résistance du circuit inducteur à chaud est de 3,3 ohms ; celle de l'induit de 4,5 ohms par phase.

Les pertes par frottement, par hystérésis et par courants de Foucault, s'élèvent à 4.900 watts.

Alternateur de la maison Siemens et Halske. — La figure 103 repré-

Digitized by Google

sente un alternateur de ce type, destiné à être commandé directement par un moteur.

Les machines commandées par courroie comportent trois paliers au lieu de deux.

L'induit est constitué par un anneau en tôle feuilletée, relié au moyen de boulons à un bâti extérieur en fonte.

A la surface interne de cet anneau, sont creusées des rainures de

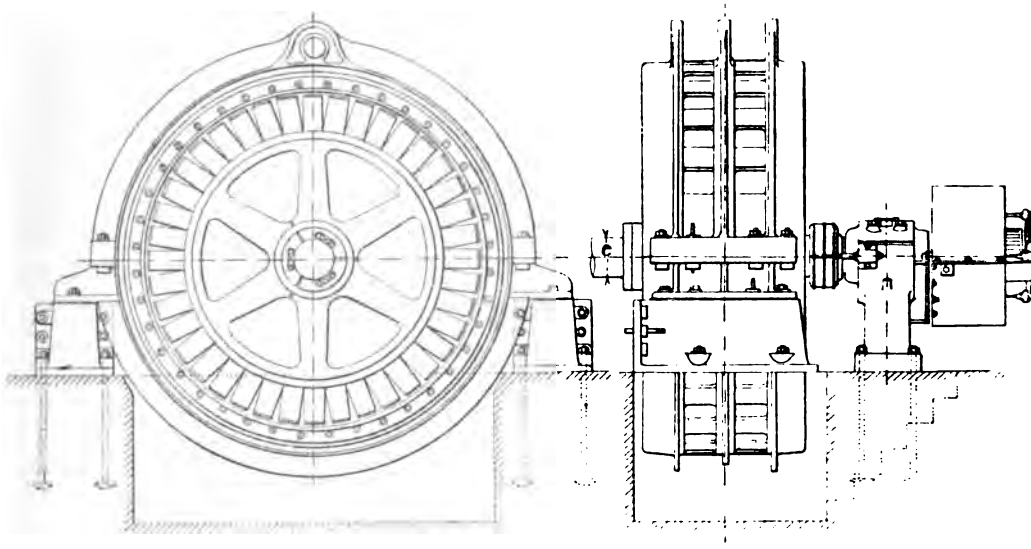


Fig. 103

la forme indiquée sur la figure 15, dans lesquels sont placés les fils ou barres induits, isolés avec de l'amiante et protégés par du papier.

L'inducteur, également en tôle feuilletée, est monté sur l'arbre, et porte extérieurement les pièces polaires.

Les alternateurs employés à Chemnitz, pour l'éclairage de la ville et l'alimentation de moteurs à courants triphasés, sont actionnés directement par la machine à vapeur. L'inducteur a 20 paires de pôles, et fait 150 tours par minute; la fréquence est donc :

$$F = \frac{20 \times 150}{60} = 50$$

La tension efficace est de 2.000 volts, et l'intensité efficace de

Digitized by Google

52 a. par phase. La puissance fournie est donc de $52 \times 2000\sqrt{2}$ watts ou environ 180 k. w.

L'excitatrice, montée sur l'arbre de l'alternateur, fournit le courant continu à la tension de 120 v.

L'induit est muni d'un enroulement supplémentaire, constitué de manière à donner le $\frac{1}{80}$ de la tension aux barres ; ce circuit sert pour la mesure du voltage, la mise en parallèle, etc., sans interposition de transformateur.

La figure 104 (1) donne la courbe du courant de l'excitatrice. Cette courbe montre une période due à la réaction d'armature, la fréquence étant une fois plus grande que celle du courant de l'alternateur.

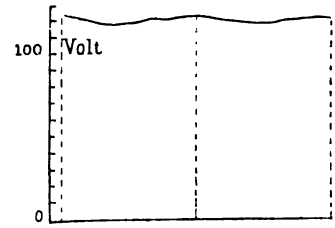


Fig. 104

Si T est la durée d'une période complète, cette courbe peut être exprimée approximativement par la relation :

$$y = 1 + \frac{1}{66} \sin\left(\frac{12\,\pi t}{T} + \frac{\pi}{2}\right)$$

La figure 105 donne la courbe de la f. e. m. de l'alternateur non chargé; on voit que cette courbe est à peu près symétrique, par rapport à l'ordonnée médiane. On peut la représenter assez bien par la formule :

$$y = \sin\frac{2\,\pi t}{T} + 0{,}087 \sin\left(\frac{10\,\pi t}{T} + \pi\right) + 0{,}052 \sin\left(\frac{22\,\pi t}{T} + \pi\right)$$

La courbe de la f. e. m. de la machine chargée (fig. 106) n'est pas symétrique par rapport à l'ordonnée médiane. On peut la représenter très approximativement par l'équation :

$$y = \sin\frac{2\,\pi t}{T} + \frac{1}{15} \sin\left(\frac{10\,\pi t}{T} + \frac{3\,\pi}{2}\right)$$

Ces courbes diffèrent peu d'une sinusoïde; pour la machine non

1. D'après un article de M. Weinhold, paru dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* cahier 1, 1895.

Digitized by Google

chargée, la f. e. m. maximum est un peu plus faible, et, pour la machine chargée, un peu plus forte que la f. e. m. maximum pour une sinusoïde ayant la même f. e. m. efficace.

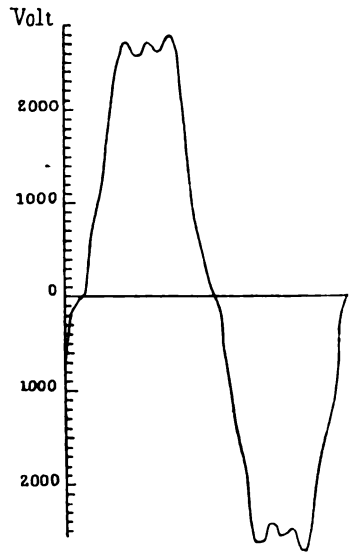


Fig. 105

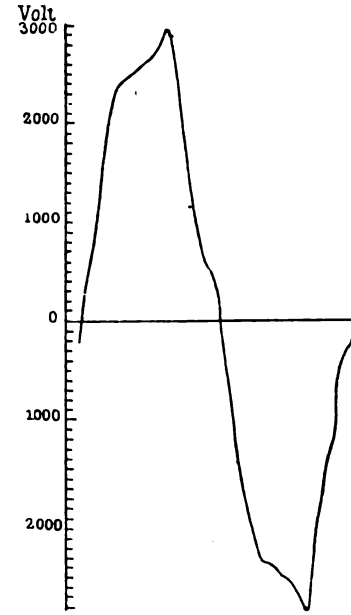


Fig. 106

Pour 2.000 volts efficaces, la f. e. m. maximum, dans le cas de sinusoïde, serait $2.000\sqrt{2} = 2.828$ v.; celle de la courbe à vide est 2.807 v.; celle de la machine à pleine charge 2.930 v.

Alternateurs biphasés de la Stanley electric C° (1). — Cet alternateur, étudié par MM. Stanley, Kelly et Chesnay (S. K. C.), de Pittsfield, fournit deux courants biphasés, à la fréquence de 133, sous une teneur efficace, soit de 1.000, soit de 2.000 v.

L'inducteur est mobile et l'induit fixe; la disposition caractéristique est que les deux circuits de l'induit sont complètement séparés.

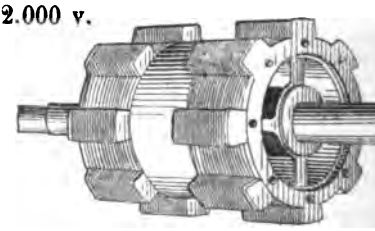


Fig. 107

L'inducteur (fig. 107) est constitué par un noyau cylindrique en acier coulé, à la périphérie duquel sont encastrées des projections

1. L'*Industrie électrique* du 25 août 1895.

Digitized by Google

polaires en tôle douce. Ces pièces polaires constituent deux couronnes placées aux extrémités du noyau, laissant entre elles la bobine d'excitation fixe, enroulée dans une gorge en cuivre.

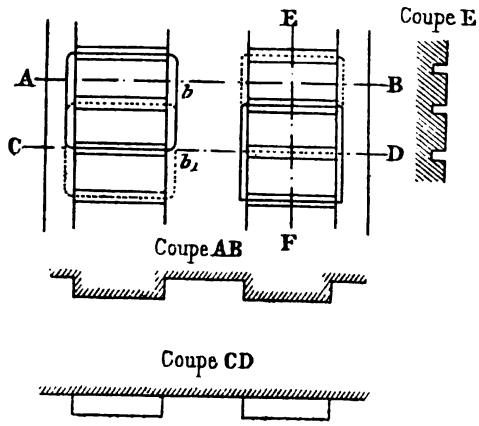


Fig. 108

Le type de l'alternateur se rapproche du type Mordey, car toutes les projections polaires d'un côté de l'armature sont d'une pola-

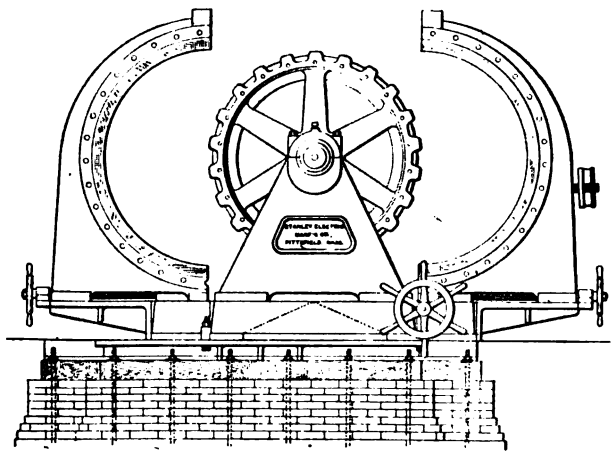


Fig. 109

rité donnée, et toutes celles de l'autre côté ont une polarité inverse, de sorte que l'induction est obtenue par variation de flux, sans inversion de ce dernier.

L'induit est en forme d'anneau, et porte à sa partie interne deux séries de projections en fer laminé, servant de noyaux aux bobines.

Digitized by Google

La figure 108 représente le développement de l'intérieur de cet anneau.

Chaque série de bobines de l'induit correspond à une des séries de pièces polaires de l'inducteur. Les bobines sont enroulées séparément sur des formes, et placées ensuite dans des rainures formées par les projections en fer laminé.

Dans les alternateurs de 240 k. w. (fig. 109), la machine s'ouvre par le milieu, suivant le plan vertical; dans ceux de moindre puissance, l'ouverture se fait suivant un plan horizontal. Les fils induits viennent se fixer sur une plaque de marbre, sur laquelle les deux moitiés de chacun des enroulements peuvent se coupler en tension ou en dérivation, suivant que l'on veut obtenir 2.000 ou 1.000 v.

§ 11. — COUPLAGE DES ALTERNATEURS.

Nous avons démontré dans le premier volume, qu'il est impossible pratiquement de grouper des alternateurs en série, mais que le couplage en parallèle est possible.

Pendant longtemps, on a cru que certains types d'alternateurs seuls avaient la faculté de pouvoir être couplés en parallèle, mais on s'est rendu compte depuis, que la question tient plutôt aux moteurs qu'aux alternateurs.

Si les moteurs qui commandent les alternateurs n'ont pas une vitesse uniforme par tour, les alternateurs peuvent bien marcher synchroniquement, mais par instant l'un d'eux devient moteur et entraine l'autre, de sorte qu'il y a alors dépense inutile d'énergie; on se rend compte de ce fait en plaçant des lampes, soit dans le circuit des deux alternateurs, soit dans le secondaire d'un transformateur alimenté par ce circuit; on remarque alors des pulsations dans la lumière de ces lampes, ce qui provient du courant de synchronisation qui s'établit par moment entre les deux alternateurs.

En 1889, M. Mordey procéda à des expériences sur le couplage des alternateurs avec deux machines du type inventé par lui.

Les deux alternateurs pouvaient facilement être couplés, même quand le couplage s'effectuait au moment où les phases des courants ne concordaient pas et qu'ils étaient excités de manière à produire

Digitized by Google

des tensions différentes. La tension aux barres omnibus était alors intermédiaire entre les tensions des alternateurs.

Quand l'admission de vapeur à l'un des moteurs était fermée, le mouvement se continuait, et l'alternateur fonctionnait comme moteur.

Quand les alternateurs sont commandés séparément par des moteurs à vapeur, la concordance s'obtient grâce à l'élasticité de la vapeur ; dans le cas où les alternateurs sont commandés par un arbre commun, par l'intermédiaire de courroies, la concordance s'obtient par suite du glissement des courroies.

Le couplage en parallèle d'alternateurs commandés par turbines se fait très bien.

Généralement, quand on veut associer en dérivation un alternateur à un ou à plusieurs alternateurs déjà en marche, on procède de la manière suivante :

On commence par mettre en marche sur une résistance, l'alternateur que l'on veut coupler, puis on augmente graduellement l'excitation jusqu'à ce que la f. e. m. aux bornes soit égale à celle du tableau. On ferme ensuite le commutateur reliant l'alternateur au tableau, au moment juste où le synchronisme est atteint et on diminue ensuite peu à peu la résistance intercalée.

On peut même ne pas faire travailler l'alternateur sur une résistance, avant de le coupler, on l'excite simplement de manière que sa tension atteigne celle du tableau, on ferme le commutateur le reliant au tableau au moment du synchronisme et on augmente ensuite graduellement l'excitation pour le mettre en charge.

Ce dernier mode de couplage est employé pour des alternateurs biphasés aux ateliers de la maison Wehyer et Richemond, et fonctionne parfaitement. Le moment exact où le synchronisme est atteint, peut se déterminer de plusieurs manières.

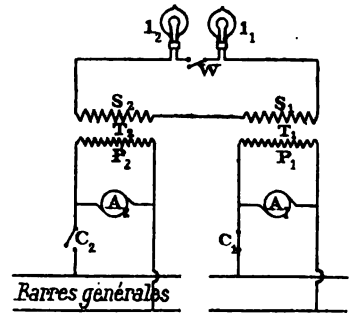


Fig. 110

La figure 110 donne le schéma du montage, T_1 et T_2 sont deux petits transformateurs, dont les primaires sont montés en dérivation sur les bornes des alternateurs (ou sur les barres du tableau).

Digitized by Google

Si les spires des secondaires S_1 et S_2 sont de même sens, quand le commutateur C_2 est fermé, les lampes s'éteignent au moment où le synchronisme est atteint.

Au lieu de deux transformateurs T_1 et T_2, on peut faire usage d'un transformateur unique à double circuit primaire.

L'appareil *acoustique* que la General Electric C° exposait à Chicago, est constitué en principe, par un cylindre en fer, fermé à ses extrémités par des diaphragmes également en fer. Deux électro-aimants se trouvent en face des deux diaphragmes, ils sont intercalés, l'un dans le circuit secondaire d'un transformateur actionné par le courant de la machine à coupler, l'autre dans le circuit secondaire d'un transformateur actionné par le courant pris aux barres de couplage du tableau.

Sous l'effet des fluctuations des courants, les deux plaques vibrent et si les deux machines ne sont pas en concordance de phase, il se produit un son discordant; à mesure qu'on approche du synchronisme, le bourdonnement disparaît pour faire place à une note très claire, au moment où le synchronisme est atteint.

On peut également employer un voltmètre monté dans le circuit secondaire d'un transformateur à double circuit primaire. Les circuits primaires sont montés en sens inverses et placés dans les circuits des deux alternateurs. Tant que le synchronisme n'est pas atteint, l'aiguille du voltmètre indique une certaine tension, au moment du synchronisme, elle marque 0.

Le voltmètre peut également être placé sur une dérivation, reliée directement aux deux alternateurs, de manière à ce que les f. e. m. y agissent en sens opposé.

A Zurich, pour le couplage d'alternateurs de 300 chevaux, du type Kapp-Oerlikon, le couplage s'effectue sans indicateur de phase, on saisit le moment où les griffes des manchons d'accouplement sont bien en coïncidence.

La figure 111, montre la disposition d'un voltmètre V_2 servant à déterminer la tension de l'alternateur que l'on veut mettre en marche, et permettant d'amener cette tension à celle indiquée par le voltmètre V_1; la figure 112, montre la disposition à prendre pour que le voltmètre V_2, serve d'indicateur de coïncidence de phase

Un seul voltmètre peut servir pour les deux indications, en établis-

Digitized by Google

sant successivement les communications indiquées figure 111 et figure 112.

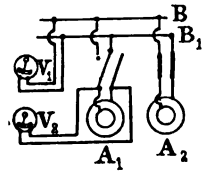


Fig. 111

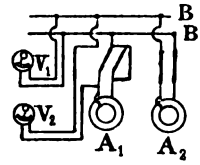


Fig. 112

M. Herrmann-Müller a appliqué à la station centrale de Budapest un appareil représenté schématiquement figures 113 et 114, qui permet de faire ces manœuvres par le simple mouvement d'une manette, évitant toute mise en court circuit et toute fausse manœuvre.

Des plots de diverses grandeurs communiquent par des liaisons indiquées sur les croquis, tant avec les bornes des divers alternateurs A_1, A_2, A_3, etc., qu'avec les barres générales du tableau.

Une manette portant trois plots isolés, entre eux, permet d'établir les contacts nécessaires.

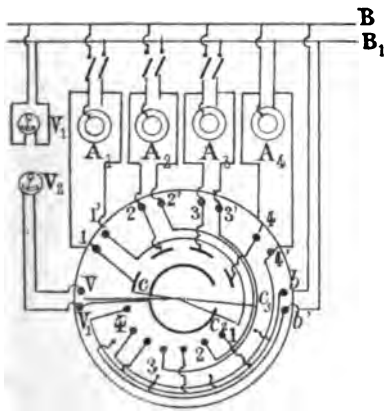


Fig. 113

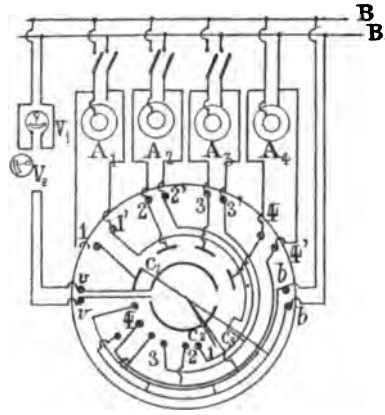


Fig 114

Dans la position indiquée sur la figure 113, le voltmètre permet de mesurer la tension de l'alternateur A_1, en faisant avancer la manette dans la direction des aiguilles d'une montre jusqu'à la position indiquée figure 114, le voltmètre indique la concordance de phases, il en est de même pour la mise en marche des alternateurs A_2, A_3 et A_4.

Dans la méthode ordinaire de couplage, il faut bien saisir le moment

Digitized by Google

du synchronisme (et il ne se produit souvent que pendant un instant très court) pour fermer le commutateur de la machine à mettre en marche, ce qui exige une grande attention et une certaine habileté.

Pour tourner cette difficulté, *M. G. Kapp* (1) a combiné un dispositif qui permet de coupler très rapidement une nouvelle machine, sans fluctuation de courant et sans réclamer une habileté particulière de l'agent préposé à la surveillance du tableau.

La figure 115 donne le schéma de ce dispositif employé à la station centrale de Bristol.

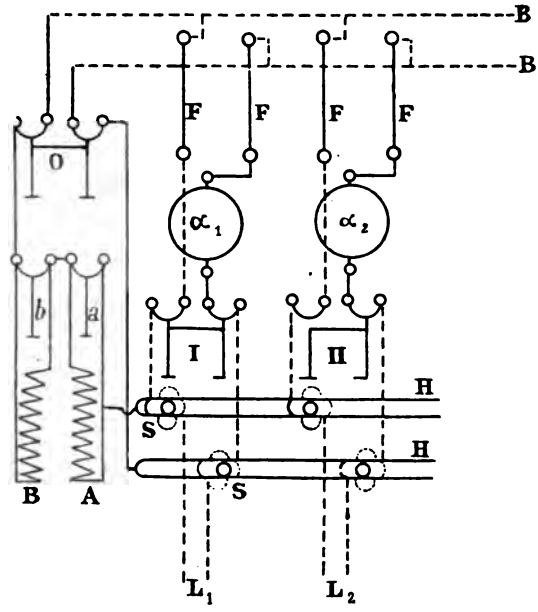


Fig. 115

L_1 et L_2 sont les câbles des alternateurs qui peuvent être reliés aux barres communes B B, par l'intermédiaire des interrupteurs doubles I et II. Les ampèremètres α_1, α_2 et des fils fusibles F sont placés sur ces conducteurs.

Outre les barres collectrices B B, deux barres auxiliaires H H sont établies sur le tableau. Ces barres auxiliaires peuvent être reliées au moyen de fiches à une paire quelconque de conducteurs. L_1, L_2, etc. Le tableau de Bristol a été installé pour cinq machines, il n'existe cepen-

1. D'après un article de M. Dieudonné, paru dans l'*Électricien* du 29 septembre 1894.

Digitized by Google

dant que deux fiches, de sorte qu'un couplage direct, en parallèle de deux ou plusieurs machines sur les barres auxiliaires est rendu impossible.

Une des barres H est reliée à la barre collectrice B correspondante, par deux bobines A et B placées en série et le commutateur double O, tandis que la deuxième barre H est mise directement en relation avec l'autre barre collectrice, par l'intermédiaire de ce même commutateur O.

Les bobines (transformateurs hérissons) possèdent des proportions d'enroulement et de fer telles que pour la tension double de celle des alternateurs, elles ne puissent être traversées que par un courant un peu inférieur au courant normal des machines. Les commutateurs *a* et *b* servent à mettre les bobines hors d'action.

Le couplage s'exécute de la manière suivante (supposons que la machine dont les câbles de liaison sont L_2, soit en service et qu'il faille mettre en marche celle qui a pour conducteur L_1).

Tous les commutateurs à gauche de II sont d'abord ouverts. La machine est excitée et mise en marche, pendant que l'on implante les fiches *s* et que l'on ferme le commutateur double O.

Le courant provenant des barres (limité dans son intensité) commence à imprimer doucement à la machine sa vitesse rigoureuse. Elle marche alors en cadence avec l'autre, mais pas encore nécessairement en phase exacte. On ferme alors le commutateur *a*, c'est-à-dire que l'on supprime du circuit la bobine A, il se produit alors une fluctuation du courant qui rapproche la machine de sa phase exacte, en fermant ensuite le commutateur *b*, une nouvelle fluctuation amène la machine à sa phase exacte.

On ferme alors le commutateur I, on ouvre les commutateurs O, *a* et *b*, on enlève les fiches et le dispositif est prêt pour une nouvelle manœuvre de couplage.

L'opération consiste donc simplement à fermer dans un ordre donné, une série de commutateurs, et il n'y a pas d'autre mesure de précaution à prendre.

« La General Electric C° americaine » procède d'une manière semblable, elle emploie des bobines à réaction dans lesquelles une forte douille de cuivre (qui remplace les commutateurs *a* et *b*) poussée de manière à recouvrir les spires, diminue la s. i.

Digitized by Google

§ 12 CALCUL D'UN ALTERNATEUR.

On se donne d'abord la fréquence du courant et le nombre de tours par minute.

Si C désigne le nombre de champs magnétiques de même sens, on aura en général :

$$F = \frac{C.N}{60} \qquad C = \frac{60\,F}{N}$$

Pour les alternateurs à tambour, intérieur ou extérieur (Brown, Oerlikon, Westinghouse, etc...), le nombre total de pôles est 2 C.

Pour les alternateurs à disque, à champs inversés (Ferranti, Patin, Siemens, etc.) le nombre de pôles d'un côté de l'armature est 2C.

Pour les alternateurs à champs non inversés (Mordey), le nombre de pôles d'un côté de l'armature est C.

Pour les alternateurs à fer tournant des types Œil-Helmer et Kingdon, on a $2p = C$, $2p$ étant le nombre de pôles.

Pour le type Thury, $d = C$, d étant le nombre de dents de la cloche.

Il faudra prendre pour C, le nombre entier, qui se rapprochera le plus du nombre trouvé et modifier soit N, le nombre de tours par minute, soit F, la fréquence (si c'est possible).

La table de la page 95 pourra être utile dans ces calculs.

On déterminera ensuite le diamètre extérieur de la partie tournante, d'après la vitesse périphérique maximum admissible, et on pourra tracer le schéma de l'alternateur, déterminer le pas, les dimensions des pièces polaires, etc.

Dans une machine à induit tournant léger, telle que la machine Ferranti, par exemple, on pourra admettre une vitesse périphérique de 25 à 30 m. à la seconde, pour un alternateur à induit en tambour de 10 à 15 m. Quand on a affaire à un alternateur à inducteur tournant, des considérations de résistance permettent de déterminer la vitesse périphérique maximum, on pourra du reste se baser sur la vitesse des alternateurs du même type, déjà construits.

On peut, après avoir effectué les calculs qui vont suivre, être amené à diminuer les dimensions de l'alternateur, si on trouve que pour un nombre admissible de spires, par exemple, l'induction magnétique est trop faible, etc....

Digitized by Google

C. NOMBRE de champs de même direction	NOMBRE DE TOURS PAR MINUTE POUR UNE FRÉQUENCE DE					
	40	50	60	80	100	130
1	2.400	3.000	3.600	4 800	6.000	7.800
2	1.200	1.500	1.800	2.400	3.000	3.900
3	800	1.000	1.200	1.600	2.000	2.600
4	600	750	900	1.200	1.500	1.950
5	480	600	720	960	1.200	1.560
6	400	500	600	800	1.000	1.300
7	343	428	514	686	857	1.114
8	300	375	450	600	750	975
9	266	333	400	544	666	866
10	240	300	360	480	600	780
12	200	250	300	400	500	650
14	172	214	257	343	429	557
16	150	187	225	300	375	487
18	133	167	200	272	333	433
20	120	150	180	240	300	390
25	96	120	144	192	240	312
30	80	100	120	160	200	260

La puissance de l'alternateur et la valeur de la f. e. m. efficace aux bornes, ne suffisent pas comme pour une dynamo à courant continu, pour déterminer un alternateur,

En effet, la puissance d'un alternateur est donnée par la relation $P = E_{eff}\ I_{eff} \cos \varphi$, et la valeur de φ, dépend à la fois, de la s. i. de l'alternateur, de la s. i. du circuit extérieur, de la résistance de ces circuits, de la capacité du circuit extérieur, etc., toutes quantités qui peuvent varier.

Si l'on installe dans le circuit, des appareils (condensateurs ou moteurs synchrones voir chapitre II) annulant le décalage, la valeur de $\cos \varphi$, devient 1 et on a :

$$P = E_{eff}.\ I_{eff}.$$

on n'a donc plus à tenir compte de la réaction d'armature.

Si l'on n'emploi pas d'appareil spécial pour annuler le décalage, on peut admettre que, $\cos \varphi = 0{,}80$ ($\varphi = 36°\ 52'\ 10''$ soit 37°). L'on se

Digitized by Google

trouve ainsi généralement au-dessus de la réalité, et l'alternateur peut servir dans la plupart des cas de la pratique.

On choisira ensuite l'induction magnétique maximum admissible. Si l'induit ne contient pas de fer, on pourra admettre une induction de 6 à 8000 unités C. G. S.

Quand l'induit contient du fer, afin de ne pas exagérer les pertes par hystérésis, il ne faut pas dépasser pour l'induction maximum dans l'induit, les valeurs suivantes, selon la fréquence.

Fréquence	Induction maximum	Fréquence	Induction maximum
40	5.500 — 6.500	90	3.700 — 4.000
50	5.000 — 6.000	100	3.500 — 3.700
60	4.500 — 5.000	110	3.200 — 3.500
70	4.300 — 4.500	120	3.000 — 3.200
80	4.000 — 4.300	130	2.800 — 3.000

On prendra pour B la valeur minimum donnée par ce tableau, et on calculera $\Phi = s\ B$, s étant la surface d'une bobine.

On admettra ensuite que la perte de tension par suite de la résistance a une certaine valeur, généralement de 1 à 3 %, et qu'il faut avoir (sans décalage) une f. e. m. $(1 + \eta)\ E_{eff} = E'$ pour avoir une tension E_{eff}, aux bornes.

Si l'on ne prend pas de dispositions pour annuler le décalage, la f. e. m. E' pourra être déterminée de la manière suivante. En se reportant à la figure 14 (page 9) on voit que l'on a :

$$OE = \frac{OA_1}{\cos \varphi} = \frac{OA + AA_1}{\cos \varphi}$$

OE représente la f. e. m. à induire, OA la f. e. m. donnée aux bornes, AA_1, la perte de charge dans l'induit et on a d'après ce qui précède.

$$AA_1 = \eta\ OA$$

On aura donc :

$$OE = \frac{OA\ (1 + \eta)}{\cos \varphi}$$

ou :

$$E' = \frac{E_{eff}\ (1 + \eta)}{\cos \varphi}$$

Digitized by Google

En admettant que la valeur de cos φ est 0,80, on a :

$$E' = 1{,}25 \quad E_{eff}\,(1 + \eta).$$

Nous avons trouvé que la f. e. m. induite (1) (Formules des pages 2 et 3) est exprimée par une relation de la forme $K\,\Phi\,n\,A\,10^{-8}$, A dépendant du type de l'alternateur, (nombre de pôles, etc...)

Pour une première approximation on prendra $K = 2{,}22$ et on aura :

$$E' = 2{,}22\;\Phi\,n\,A\,10^{-8}.$$

On tirera de cette relation la valeur de n, nombre de spires de l'induit.

Si b, est le nombre de bobines, que l'on veut placer en série, et n_1 le nombre de spires d'une bobine, en aura.

$$b\,n_1 = n \qquad n_1 = \frac{n}{b}$$

On prendra pour n_1, le nombre entier immédiatement supérieur au nombre trouvé.

Si l'alternateur est désigné comme devant fournir un courant d'intensité I_{eff}, donnée, on calculera la section du fil induit, de manière à avoir une densité de courant admissible.

Si l'alternateur doit avoir une puissance donnée, pour une tension efficace donnée, la valeur de l'intensité efficace, dépendra du décalage, on aura :

$$I_{eff} = \frac{P}{E_{eff}\cos\varphi} = \frac{P}{0{,}80\;E_{eff}}$$

et on calculera la section du fil de manière à avoir une densité de courant admissible.

Dans les alternateurs à induit mobile, ne contenant pas de fer, du type Ferranti, par exemple, on peut admettre une densité de courant, atteignant 6 ampères par millimètre carré. Quand l'induit contient du fer, la chaleur développée par les pertes par hystérésis, etc..., vient s'ajouter à celle due aux pertes par résistance (RI^2_{eff}) et on ne doit pas dépasser une densité de 3 ampères par m. m^2. On pourra du reste se baser sur la densité admise dans des machines du même type, déjà construites.

Ayant calculé la section du fil, ou du ruban, et déterminé l'épaisseur de l'isolant pour résister à la tension maximum, (voir chapitre VI), on pourra faire le tracé des bobines et voir si la perte de

1. Dans les relations données, pages 2 et 3, il faut remplacer B par Φ et *vice versa*. B étant l'induction maximum et Φ le flux total traversant une bobine induite.

Digitized by Google

tension (RI_{eff}) ne dépasse pas la valeur admise, car dans ce cas, il faudrait augmenter la section du fil.

On pourra alors dessiner les bobines, tracer la courbe de la f. e. m. (Pages 1, 2, 3 et 5) et déterminer la valeur de K.

Des valeurs de K, η (que l'on aura déterminées) n, A, on tirera la nouvelle valeur de Φ et en la divisant par la section d'une bobine s, la valeur B de l'induction magnétique maximum, qui devra être au plus égale à la plus petite valeur donnée dans la table de la page 96, pour la fréquence admise, (dans le cas où il y a décalage du courant) en tenant compte dans le cas où l'induit contient du fer, de l'espace occupé par le papier isolant, c'est-à-dire qu'alors on aura :

$$B = \frac{\Phi}{0{,}85\,s}$$

On pourra alors tracer la ligne moyenne d'un champ magnétique et déterminer le nombre d'ampères-tours nécessaires pour l'excitation.

Il faut donc créer, Φ lignes de force traversant l'induit, c'est-à-dire à cause de la dispersion, un flux de force plus grand, dans les inducteurs.

Dans un alternateur avec induit en tambour, il faut créer 1,25 Φ lignes de force, (la dispersion est de 20 %). Dans un alternateur à disque avec champs inversés, 1,15 à 1,20 Φ. Dans un alternateur Mordey, 1,10 Φ. Schuckert et Kapp, 1,36 Φ.

On déterminera ensuite l'induction magnétique maximum B dans les diverses parties du champ (en tenant compte si il y a lieu de la surface perdue quand il y a du papier intercalé).

Le nombre d'ampères-tours nécessaires pour l'excitation sera :

$$Qi = \Sigma \frac{l\,B}{0{,}4\,\pi\,\mu}$$

l, étant la longueur des lignes de force, dans les diverses parties du champ, B l'induction magnétique maximum, μ la perméabilité magnétique, dépendant de la nature du métal et de B.

Les courbes de la figure 116 donnent immédiatement les valeurs telles que $\frac{B}{0{,}4\pi\mu}$, c'est-à-dire le nombre d'ampères-tours ou la force magnétomotrice, par centimètre de longueur, pour la fonte grise, le fer doux recuit, l'acier doux. Ces courbes ont été tracées pour le

Digitized by Google

fer doux recuit et la fonte, d'après les données de la maison Mather et

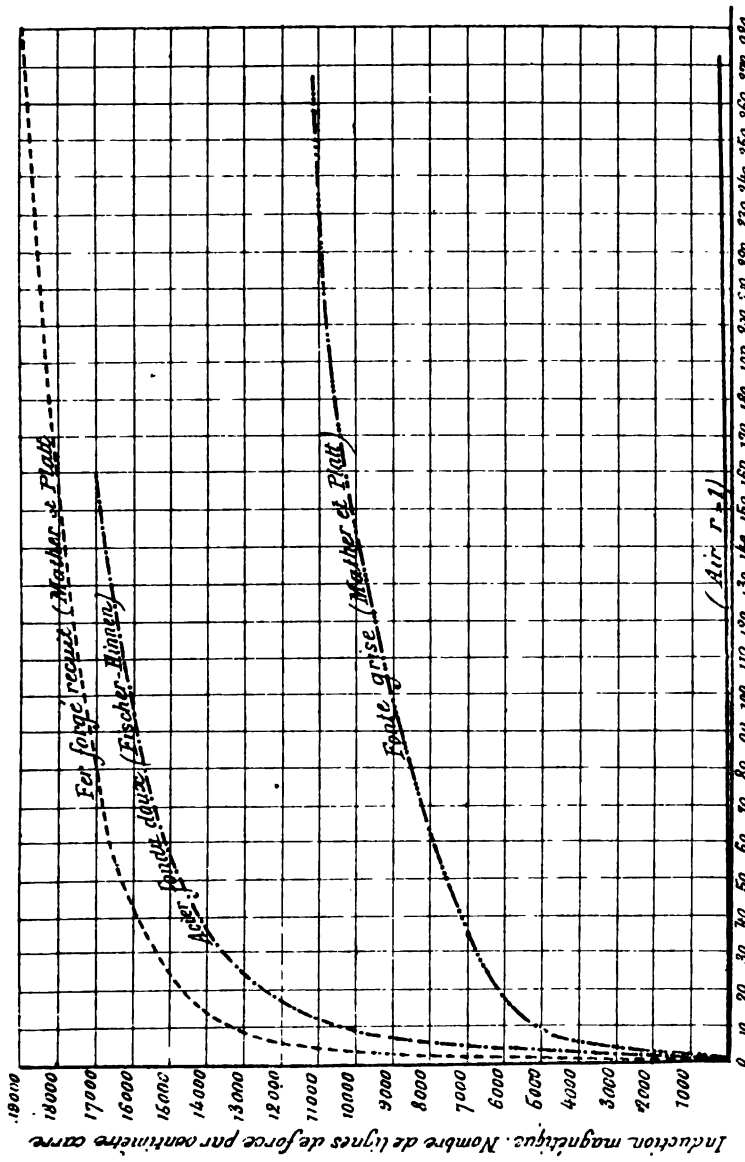


Fig. 116

Platt et pour l'acier doux, d'après les données de M. Fischer-Hinnen (1) Ingénieur de la société d'Oerlikon.

1. *Die Berechnung und Wirkungsweise der elektrischen Gleichstrommaschinen* par Fischer-Hinnen.

Digitized by Google

Naturellement, suivant le métal qu'on emploiera, il faudra tracer au préalable, la courbe après essais de perméabilité magnétique.

Pour l'entrefer (comprenant au besoin l'induit, si il n'a pas de fer, exemple l'alternateur Westinghouse) on aura :

$$qi = \frac{l_a \, B}{0{,}4\,\pi} = 0{,}796 \; l_a \; \frac{\Phi}{S}$$

Les valeurs suivantes devront être appliquées dans les divers cas :

Pour un induit en tambour (fig. 117) :

DÉSIGNATION	SECTION en c. m².	INDUCTION MAGNÉTIQUE Φ		LONGUEUR applicable en centimètres
		Métal feuilleté	Non feuilleté	
Culasse. . .	S_1	$\frac{1{,}25.\ \Phi}{2.\ 0{,}85\ S_1}$	$\frac{1{,}25\ \Phi}{2\ S_1}$	l_1
Electros . .	S	$\frac{1{,}25\ \Phi}{0{,}85\ S}$	$\frac{1{,}25\ \Phi}{S}$	$2\ l_2$
Entrefer . .	S	»	$\frac{\Phi}{S}$	$2\ l_a$
Armature .	S_3	$\frac{\Phi}{0{,}85\ S_3}$	$\frac{\Phi}{S_3}$	l_3

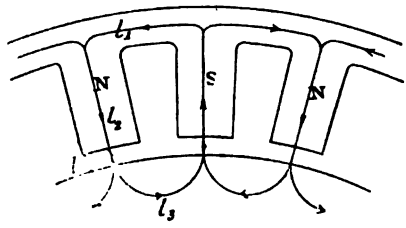


Fig. 117

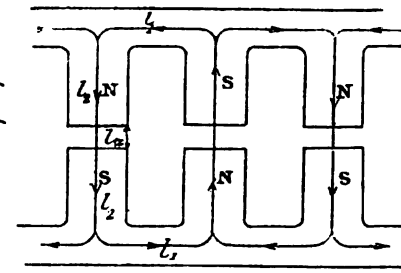


Fig. 118

Le nombre total d'ampères-tours à engendrer étant Qi, l'enroulement d'un électro devra produire $\frac{Qi}{2}$ ampères-tours (après avoir ajouté à Qi, calculé comme il est indiqué ci-dessus, le nombre d'ampères-tours destinés à vaincre la réaction d'armature, comme nous le verrons plus loin).

Pour un induit à disque (fig. 118) :

Digitized by Google

DÉSIGNATION	SURFACE en c. m².	INDUCTION MAGNÉTIQUE Φ		LONGUEUR applicable en centimètres
		Métal feuilleté	Non feuilleté	
Culasses. . .	S_1	$\frac{1{,}15\ \Phi}{2.\ 0{,}85\ S_1}$	$\frac{1{,}15\ \Phi}{2\ S_1}$	$2\ l_1$
Electros. . .	S	$\frac{1{,}15\ \Phi}{0{,}85\ S}$	$\frac{1{,}15\ \Phi}{S}$	$4\ l_2$
Entrefer. . .	S	»	$\frac{\Phi}{S}$	$2\ l_a$

Si Qi est le nombre total d'ampères-tours, un électro devra produire $\frac{Qi}{4}$ ampères-tours.

Type Mordey (fig. 119) p étant le nombre de champs magnétiques dans l'induit :

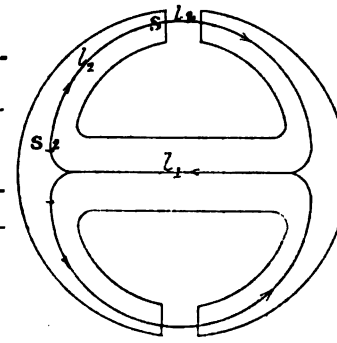


Fig. 119

DÉSIGNATION	SECTION en c. m²	INDUCTION MAGNÉTIQUE Φ	LONGUEUR applicable en centimètres
Bras	S	$\frac{1{,}10\ \Phi}{S}$	l_3
id.	S_2	$\frac{1{,}10\ \Phi}{S_2}$	l_2
Noyau.	S_1	$\frac{p.\ 1{,}10\ \Phi}{S_1}$	l_1
Entrefer.	S	$\frac{\Phi}{S}$	l_a

L'enroulement de l'électro devra produire Qi ampères-tours.

Digitized by Google

Si l'alternateur doit agir dans un réseau où l'on prend des dispositions pour annuler le décalage, on pourra procéder immédiatement au calcul de l'enroulement des inducteurs.

Dans le cas contraire, il faudra ajouter aux ampères-tours calculés, ceux nécessaires pour compenser la réaction d'induit.

φ étant l'angle de décalage.

Si la machine doit fournir un courant d'intensité efficace I donnée, le nombre d'ampères-tours supplémentaires sera (voir page 17) :

$$X_b = 0{,}0156\, n_1\, I\, \varphi^\circ$$

n_1 étant le nombre des spires d'une bobine induite.

Si la machine doit avoir une puissance donnée, pour actionner des moteurs, par exemple, l'intensité efficace à admettre sera :

$$I_{eff} = \frac{P}{\cos\varphi\, E_{eff}}$$

En ajoutant X_b à Qi, calculé précédemment, on aura le nombre total d'ampères-tours à créer par bobine inductrice.

Il faudra alors examiner si l'induction magnétique ne dépasse pas les valeurs données page 96.

On pourra admettre que si Qi ampères-tours donnent une induction magnétique $\frac{\Phi}{s}$, $Qi + X_b$ ampères-tours donneront une induction :

$$B_1 = \frac{\Phi}{s} \cdot \frac{Qi + X_b}{Qi}$$

Si l'induction trouvée ne dépasse pas la valeur admissible pour la fréquence donnée, on pourra adopter cette induction, car Φ_1 est en réalité plus petit que cette valeur, parce que la résistance magnétique augmente avec l'induction, dans les parties constituées par un métal magnétique.

Si la valeur trouvée pour B_1 dépasse de beaucoup la valeur donnée au tableau, il faudra soit augmenter n_1, le nombre des spires induites, soit augmenter la surface des bobines, en les faisant plus larges dans le sens de l'axe, par exemple, (car on ne peut augmenter le diamètre de la partie tournante).

Digitized by Google

Si la valeur trouvée pour B_1 était de beaucoup inférieure à la valeur admissible, on pourrait diminuer n_1, ou bien réduire les dimensions de l'alternateur, en donnant à la partie tournante une vitesse périphérique moindre.

Ordinairement le courant d'excitation de l'alternateur est dérivé d'un circuit ayant une différence de potentiel e donnée.

On doit calculer le diamètre du fil pour que, sans intercalation de la résistance d'un rhéostat, la f. e. m. fasse naître dans le circuit dérivé un courant d'intensité suffisante pour l'excitation à pleine charge; puis on calcule ensuite la résistance du rhéostat à intercaler dans la dérivation, pour qu'à vide sans décalage, on ait l'intensité voulue pour l'excitation.

Soit $Qi = A$, le nombre d'ampères-tours nécessaires à l'excitation d'un électro, à pleine charge. Si r est la résistance du circuit dérivé, on devra avoir :

$$e = ri.$$

On prendra approximativement la longueur l_1 d'une spire, d'après la section connue du noyau, en admettant, par exemple, que l'axe de la section moyenne est à 5 ou 10 mm. (et même plus, si la bobine doit au préalable être enroulée sur une carcasse) du bord extérieur du noyau.

Si m est le nombre de bobines que l'on veut placer en série, la longueur du fil sera donnée par la relation :

$$l = m\,Q\,l_1 = \frac{m\,A\,l_1}{i}$$

On aura :

$$r = \frac{\alpha\, m\,A\,l_1}{i\,\sigma}$$

et comme :

$$e = ri = \frac{\alpha\, m\,A\,i_1\,i}{i\,\sigma}$$

on aura :

$$\sigma = \frac{\alpha\, m\,A\,l_1}{e}$$

Digitized by Google

Si e est exprimé en volts, l en mètres, en prenant pour α la valeur 0,02 (1), σ sera exprimé en mm².

On calculera alors le diamètre du cuivre d, et en y ajoutant l'épaisseur de l'isolant, on déterminera le diamètre total d_1.

On admettra ensuite une densité d'environ 2 ampères par mm², et on aura :

$$i = 2\sigma$$

Ce qui permettra de déterminer Q par la relation :

$$Q = \frac{\Lambda}{i}$$

On prendra naturellement pour Q le nombre entier le plus rapproché de la valeur trouvée.

Si h est la hauteur en mm. de la bobine, le nombre de spires par couche sera :

$$n' = \frac{h}{d_1}$$

le nombre n'_1 de couches sera donné par la relation :

$$n'\, n'_1 = Q \qquad n'_1 = \frac{Q}{n'} = \frac{d_1\, Q}{h}$$

On pourra même au besoin augmenter h légèrement sans être obligé de recommencer les calculs, la résistance magnétique n'augmentant pas d'une manière sensible, car les noyaux sont en fer doux ou en tôle feuilletée.

On pourra alors déterminer complètement la bobine, la longueur L' du fil enroulé, sa résistance r_1, et calculer la perte en watts $r_1 i^2$. On vérifiera alors si la surface de refroidissement, c'est-à-dire la surface extérieure de la bobine est suffisante.

Si cette surface est bien ventilée (inducteur tournant), on devra avoir 4 à 6 cm² de surface de refroidissement par watt transformé en chaleur, si la bobine est fixe, de 8 à 12 cm² par watt.

Si la surface de refroidissement n'est pas suffisante, on devra diminuer la densité du courant par mm² et recommencer le calcul.

1. Ce qui correspond à du cuivre pur, à la température de 60°.

Digitized by Google

Si la surface de refroidissement dépasse de beaucoup les valeurs données ci-dessus, on pourra augmenter la densité par mm², ce qui diminuera le poids du cuivre.

Du tracé de la bobine, on déduira la longueur l_1' de la spire moyenne et la longueur totale l_2' des fils de liaison.

La longueur totale du circuit sera :

$$L = m\,Q\,l'_1 + l'_2$$

On calculera la résistance totale r de ce circuit, et on vérifiera si on a bien :

$$e = r\,i \qquad\qquad i = \frac{e}{r}$$

Si on trouve une valeur trop faible pour i, ou une valeur beaucoup trop forte, on recommencera les calculs, en admettant comme nouvelle longueur moyenne d'une spire la valeur trouvée l_1'.

Généralement, on obtiendra alors un résultat suffisamment exact, ce que l'on pourra vérifier du reste, en recommençant le tracé de la bobine.

Il faudra ensuite calculer la résistance maximum du rhéostat à intercaler.

A vide et sans décalage, la f. e. m. induite devra être égale à E_{eff}.

On peut admettre, sans grande erreur, que les ampères-tours sont proportionnels aux f. e. m. induites, si Qi_1 est le nombre d'ampères-tours, pour la marche à vide, on aura :

$$\frac{Q\,i_1}{Q\,i} = \frac{E_{eff}}{E'}$$

$$i_1 = i\,\frac{E_{eff}}{E'}$$

Si on a m_1 circuits d'excitation placés en dérivation (comprenant chacun m bobines en tension), le courant pris sur la dérivation devra avoir une intensité $m_1 i$, lors de la marche à pleine charge.

Quand l'alternateur n'est pas en charge, le courant pris sur la dérivation devra alors avoir l'intensité $m_1 i_1$.

La résistance des circuits dérivés est $\frac{r}{m_1}$ et on aura, à pleine charge.

$$e = \frac{r}{m_1}\,m_1\,i = r\,i$$

Digitized by Google

Si R est la résistance du rhéostat, on devra avoir, à vide :

$$e = \left(R + \frac{r}{m_1}\right) m_1 i$$

relation qui permettra de déterminer R, la résistance à donner au rhéostat.

Si le courant d'excitation doit être fourni par une dynamo spéciale (shunt), on se donnera la valeur de la tension de cette dynamo pour le cas où l'alternateur marche à pleine charge. On déterminera alors comme il est indiqué ci-dessus, la résistance r d'un circuit d'excitation, ainsi que l'intensité du courant $m_1 i$. On calculera ensuite la résistance à introduire dans le circuit d'excitation de la dynamo shunt, pour avoir, quand l'alternateur marche à vide et sans décalage, comme tension aux bornes de cette dynamo :

$$e' = r i_1$$

Dans le cas où l'alternateur est auto-excitateur, on se donnera le travail que l'on veut admettre pour l'excitation, ordinairement 1 à 3 % de la puissance totale et on augmentera l'intensité efficace du courant de l'armature dans cette proportion. Si la tension aux bornes est trop élevée, on intercalera un transformateur en avant du redresseur, et on déterminera le rapport de transformation, en prenant pour la tension efficace aux bornes du secondaire une valeur convenable e; on déterminera ensuite absolument comme ci-dessus la section du fil et la résistance du rhéostat à intercaler.

On pourra ensuite calculer le rendement de l'alternateur, en calculant les diverses pertes par frottements (à déterminer par analogie avec un alternateur existant), par résistance, par hystéresis et courants de Foucault.

Les deux tables suivantes pourront être utiles pour déterminer les pertes par hystérésis et courants de Foucault.

Pour avoir la perte par hystérésis par cm³ il suffira de multiplier les valeurs de $F B^{1,6} 10^{-7}$, données par la première table, par la valeur appropriée de η, donnée dans le premier volume page 270.

Pour avoir la perte par courants de Foucault par cm³, il suffira de multiplier les valeurs de $0{,}16\ F^2 B^2 10^{-14}$, par le carré de *l'épaisseur* de la tôle employée, exprimée *en dixièmes de millimètres*.

Digitized by Google

Table des valeurs de $FB^{1,6}\ 10^{-7}$

INDUCTION maximum par cm²	FRÉQUENCE OU NOMBRE DE PULSATIONS PAR SECONDE					
	40	50	60	80	100	133
2.000	0,7658	0,9563	1,1487	1,5316	1,9125	2,5439
2.500	1,0934	1,3667	1,6401	2,1868	2,7334	3,6354
3.000	1,4687	1,8295	2.1955	2,9274	3,6590	4,8668
3.500	1,8731	2,3414	2,8096	3,7462	4,6828	6,2282
4.000	2,3193	2,8991	3,4789	4,6386	5,7982	7,7116
4.500	2,8003	3,5004	4,2005	5,6006	7,0008	9,3109
5.000	3,3145	4,1431	4,9717	6,6290	8,2862	11,0206
5.500	3,8605	4,8256	5.7907	7,7210	9,6512	12,8361
6.000	4,4372	5,5464	6,6558	8,8744	11,0928	14,7535
6.500	5,0434	6,3042	7,5651	10,0868	12,6084	16,7692
7.000	5,6783	7,0978	8,5174	11,3566	14,1956	18,8801
7.500	6,3410	7,9261	9,5115	12,6820	15,8523	21,0838
8 000	7,0308	8,7885	10,5462	14,0616	17,5770	23,3774
8 500	7,7470	9,6837	11,6205	15,4940	19,3674	25,7585
9.000	8,4888	10,6114	12,7332	16,9776	21,2228	28,2254
9.500	9,2558	11,5798	13,8837	18,5116	23,1596	30,7758
10.000	10,0475	12,5595	15,0712	20,0950	25,1191	33,4081

Table des valeurs de $0,16\ F^2\ B^2\ 10^{-14}$

INDUCTION maximum par cm²	FRÉQUENCE OU NOMBRE DE PULSATIONS PAR SECONDE					
	40	50	60	80	100	133
2.000	0,000010	0,000016	0,000023	0,000041	0,000064	0,000113
2.500	0,000016	0,000025	0,000036	0,000064	0,000100	0,000177
3.000	0,000023	0,000036	0,000052	0,000092	0,000144	0,000255
3.500	0,000031	0,000049	0,000071	0,000126	0,000200	0,000350
4.000	0,000041	0,000064	0,000092	0,000164	0,000256	0,000453
4.500	0,000052	0,000081	0,000116	0,000207	0,000324	0,000573
5.000	0,000064	0,000100	0,000144	0,000256	0,000400	0,000708
5.500	0,000077	0,000121	0,000174	0,000310	0,000696	0,000856
6.000	0,000092	0,000142	0,000207	0,000369	0,000576	0,001019
6.500	0,000108	0,000169	0,000243	0,000433	0,000676	0,001196
7.000	0,000125	0,000196	0,000282	0,000502	0,000784	0,001387
7.500	0,000144	0,000225	0,000324	0,000576	0,000900	0,001592
8.000	0,000164	0,000256	0,000369	0,000655	0,001024	0,001811
8.500	0,000185	0,000289	0,000416	0,000740	0,001156	0,002045
9.000	0,000207	0,000324	0,000467	0,000829	0,001296	0,002292
9.500	0,000231	0,000861	0,000520	0,000924	0,001441	0,002554
10.000	0,000256	0,000400	0,000576	0,001024	0,001600	0,002830

Digitized by Google

CHAPITRE II

Les Moteurs.

§ 1er. — LES CHAMPS TOURNANTS EN PRATIQUE

Nous avons étudié dans la partie théorique, les champs tournants comme étant produits par des courants polyphasés parcourant des cadres disposés symétriquement autour d'un axe commun. Dans ce cas, la perméabilité du milieu étant constante, le champ est uniforme (1er volume, pages 152 et 156).

Pratiquement, les cadres sont placés dans un milieu magnétique, de sorte que l'intensité du champ n'est pas absolument constante, par suite des pertes par hystérésis et courants de Foucault, de la variation de la perméabilité magnétique, etc. La figure 120, donne

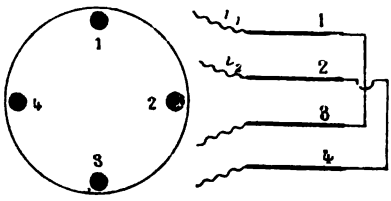


Fig. 120.

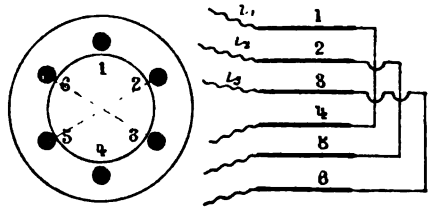


Fig. 121.

le schéma d'un champ biphasé obtenu au moyen de deux cadres disposés à l'extérieur d'un tambour, et la figure 121, celui d'un champ triphasé, les trois cadres étant disposés à l'intérieur d'un anneau.

On peut également obtenir des champs tournants au moyen de pièces polaires. La figure 122 donne le schéma d'un champ biphasé.

Dans ce cas, comme on peut facilement s'en rendre compte en

Digitized by Google

faisant le tracé, même si l'on admet que le milieu a une perméabilité constante, l'intensité du champ n'est pas constante, elle varie dans le rapport de 1 à $\sqrt{2}$ ou de 1 à 1,41.

Dans un champ triphasé avec pièces polaires, l'intensité du champ

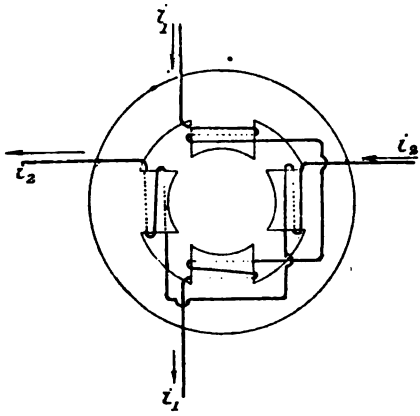


Fig. 122

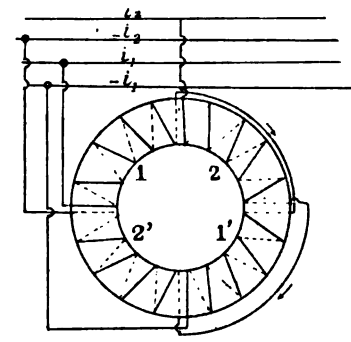


Fig. 123

est déjà plus uniforme, elle varie dans le rapport de 1 à $\frac{\sqrt{3}}{2}$ ou de 1 à 1,16.

On peut également obtenir des champs tournants en employant l'enroulement Gramme, les bobines étant disposées sur un anneau en tôle feuilletée.

La figure 123 donne le schéma d'un enroulement biphasé, recou-

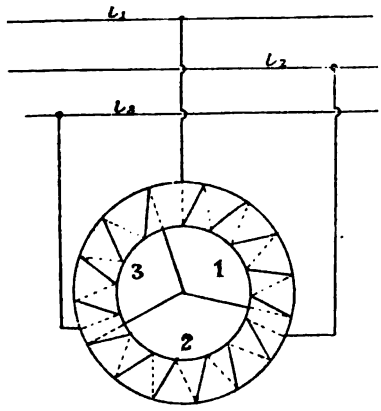


Fig. 124

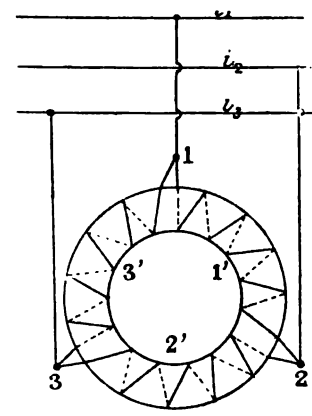


Fig. 125

vrant toute la surface de l'anneau, les bobines 1 et 1' sont enroulées en

Digitized by Google

sens contraires, la bobine 2 est enroulée dans le même sens que la bobine 1 et la bobine 2' dans le même sens que la bobine 1'.

La figure 124 donne le schéma d'un enroulement Gramme pour courants triphasés avec montage en étoile, et la figure 125 pour courants triphasés avec montage en triangle. Dans chacun de ces cas, les trois bobines sont enroulées dans le même sens.

Comme les champs produits par des enroulements Gramme, sont loin d'être d'intensité constante, il y a avantage à augmenter le nombre de bobines, car on augmente ainsi la constance du champ.

M. Dobrowolsky, en enroulant chaque phase deux fois sur l'anneau en sens contraires (fig. 126), a pu obtenir avec des courants triphasés,

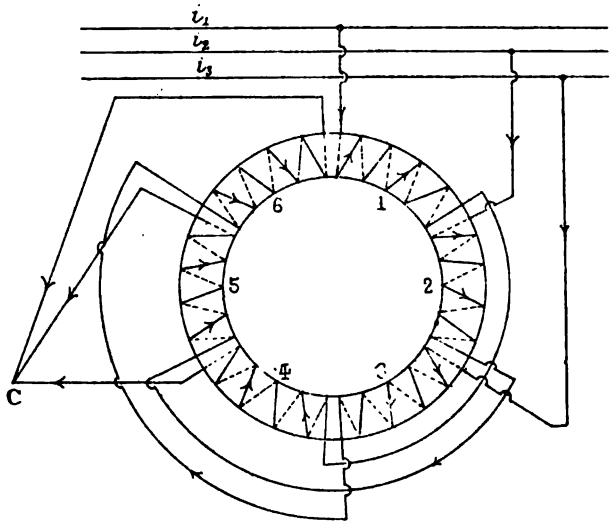


Fig. 126

un champ correspondant à celui produit par six courants décalés de $\frac{2\pi}{6}$ (voir 1er volume, page 179). Il a également obtenu avec trois courants décalés de $\frac{2\pi}{3}$, en combinant le montage en triangle avec le montage en étoile, un champ tournant correspondant à celui produit par douze courants décalés de $\frac{2\pi}{12}$. La figure 127 donne le schéma de ce montage, que nous avons étudié dans le 1er volume, page 135.

On peut également, comme l'a fait M. Haselwander, obtenir un champ tournant, au moyen d'un anneau Gramme, muni d'un enroule-

Digitized by Google

ment continu, comme l'indiquent les figures 128 et 129. Il y a lieu de remarquer que dans le cas du courant biphasé (fig. 128), il faut em-

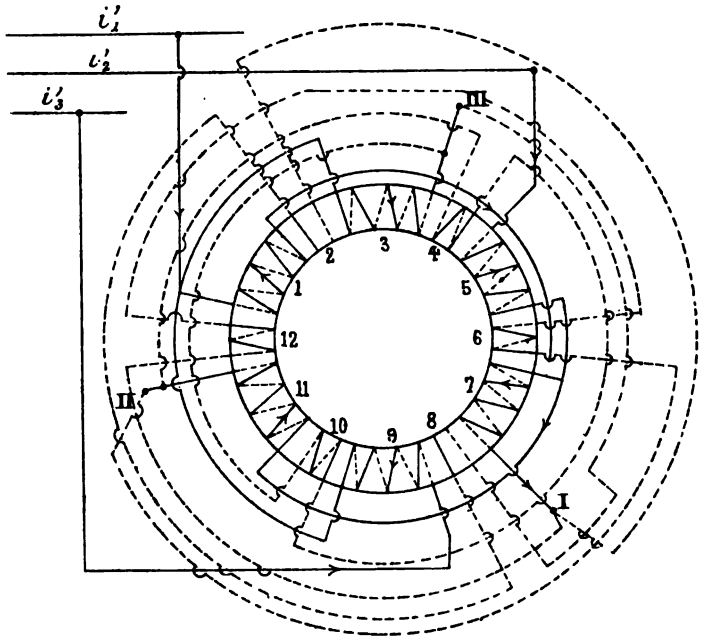


Fig. 127

ployer deux fils de retour, car sans cela il y aurait court circuit dans l'anneau.

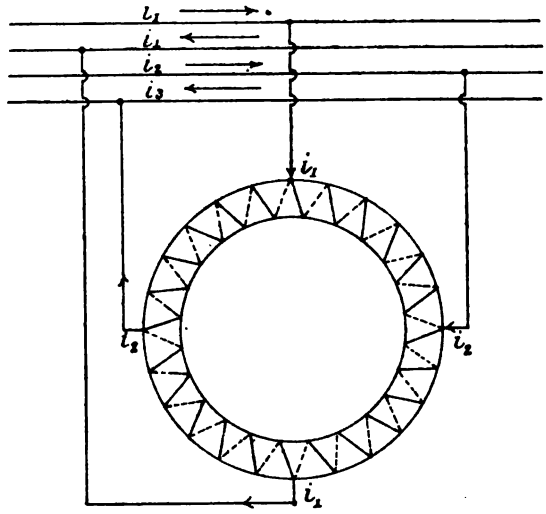


Fig. 128

Digitized by Google

Le système Haselwander peut également être appliqué aux enroulements en tambour, toutes les barres étant reliées à une de leurs extrémités au moyen d'une bague. Les figures 130 et 130 *bis* donnent le schéma pour un enroulement biphasé monté à l'intérieur d'un anneau.

Dans tous les systèmes que nous avons examinés jusqu'ici, le champ produit est *bipolaire* et fait un tour complet par période. La vitesse angulaire est égale à la pulsation ou vitesse angulaire du courant. La vitesse d'un moteur synchrone, ou même celle d'un moteur asynchrone (car en pratique, comme nous le verrons, la vitesse d'un tel moteur est voisine du synchronisme) peut être beaucoup trop élevée, surtout quand ce moteur est d'une certaine puissance.

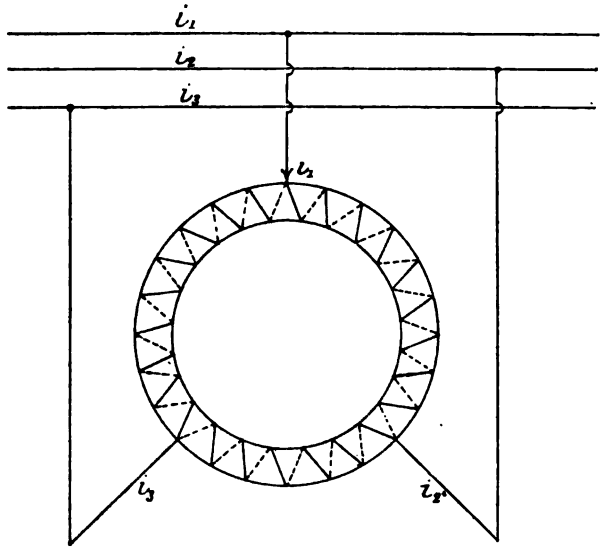


Fig. 129

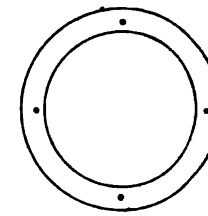


Fig. 130

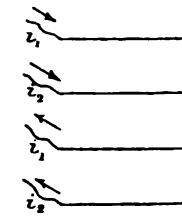


Fig. 130 *bis*

On a donc été amené, afin de réduire la vitesse du moteur, à produire des champs *multipolaires*. Si le champ a 2 p pôles, la vitesse est le $p^{ième}$ de la vitesse angulaire ou pulsation du courant et le nombre de tours, par minute du champ, est donné par la relation $N = \frac{60\ F}{p}$. (Voir la table de la page 95, en y faisant $C = p$).

Le champ est alors loin d'avoir une intensité constante, ainsi que l'on peut s'en assurer en déterminant graphiquement les résultantes; mais, la réaction d'armature tendant à le rendre constant, on peut admettre sans grande erreur que l'intensité est pratiquement constante.

Digitized by Google

Les champs multipolaires peuvent être obtenus au moyen de l'enroulement en tambour; on se trouve alors dans le cas des alternateurs polyphasés, avec barres dans l'induit, que nous avons étudiés page 63, et dont l'enroulement est représenté schématiquement sur les figures 72 à 75.

Un champ biphasé à deux p pôles, est constitué par 8 p barres ou ensembles de barres (car une barre peut être remplacée par plusieurs fils), un champ triphasé par 12 p barres ou ensembles de barres.

Les champs multipolaires, avec pièces polaires, ont été également étudiés pour le cas des alternateurs polyphasés. (Voir page 62) et les figures 69, 70 et 71).

On peut également obtenir des champs multipolaires avec l'enroulement Gramme; le fil correspondant à chaque phase étant enroulé de manière à former 2 p bobines (le champ ayant 2 p pôles), disposées symétriquement autour d'un anneau, et enroulées alternativement en sens contraire.

La figure 131 donne le schéma d'un enroulement biphasé, donnant naissance à un champ à 6 pôles $\left(N = \frac{60\,F}{3}\right)$.

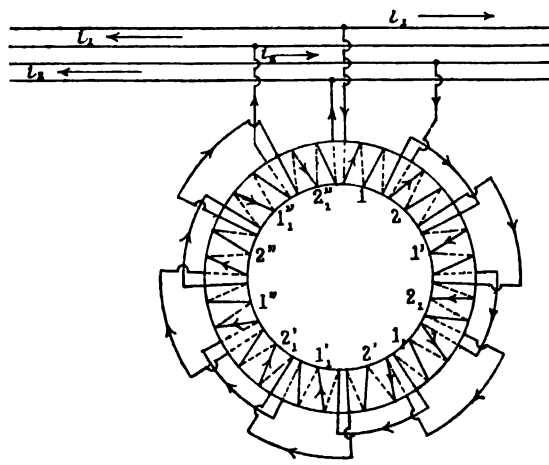


Fig. 131

L'enroulement comporte six bobines par phases :

1 — 1' — 1_1 — $1'_1$ — 1'' — $1''_1$ et 2 — 2_1 — 2' — $2'_1$ — 2'' — 2_1''; les bobines 1 — 1_1 — 1'' — 2 — 2' et 2'' étant enroulées dans un sens, et

Digitized by Google

les bobines 1' — 1'$_1$ — 1''$_1$ — 2$_1$ — 2'$_1$ et 2''$_1$ étant enroulées dans le sens contraire.

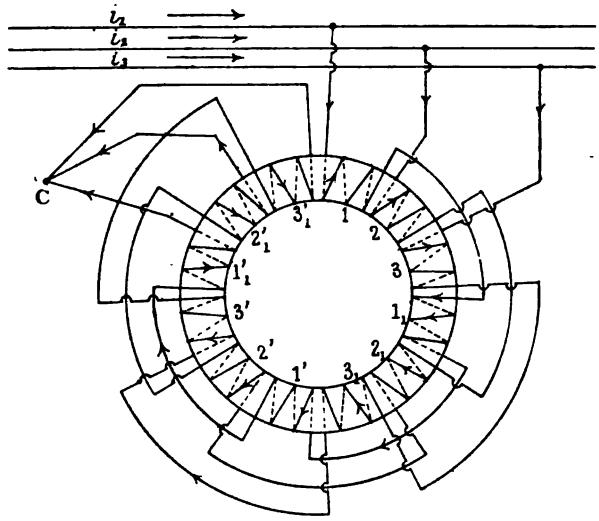


Fig. 132

La figure 132 donne le schéma d'un enroulement triphasé, produi-

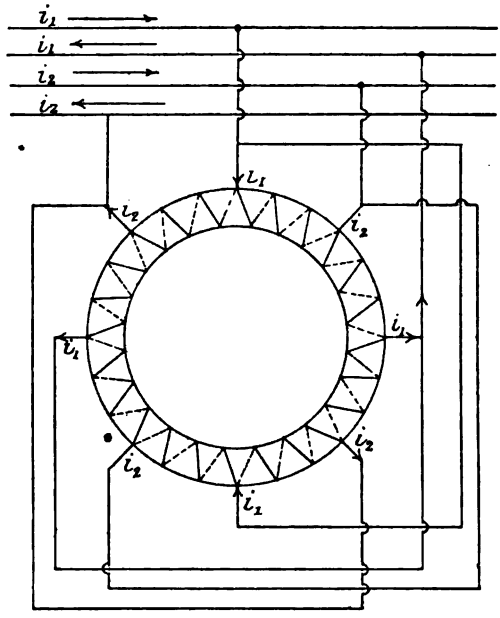


Fig. 133

Digitized by Google

sant un champ tournant à quatre pôles, chaque phase comportant quatre bobines.

En général, pour obtenir un champ tournant à 2 p pôles dans le cas de courants biphasés, il faut 4 p bobines, et dans le cas de courants triphasés 6 p bobines.

On peut également obtenir de la même manière, en employant le système Haselwander (enroulement Gramme continu) des champs multipolaires. La figure 133 donne le schéma d'un champ biphasé à quatre pôles, la bobine étant partagée en huit parties.

§ 2. — HISTORIQUE ET CLASSIFICATION DES MOTEURS

Ce sont MM. Hopkinson et Gryllis Adams qui firent les premiers essais de transmission d'énergie, au moyen d'un moteur à courant monophasé. L'impossibilité du démarrage sans dispositions spéciales empêcha leur emploi, surtout pour les moteurs de faible puissance, pour lesquels, l'adjonction d'un dispositif de démarrage est relativement très coûteuse. On chercha donc un moteur à courants alternatifs pouvant démarrer seul, même en charge.

Dans sa célèbre expérience, Arago avait montré qu'un disque peut tourner sous l'influence d'un champ magnétique tournant.

En juin 1879, Walter Baily fit, à la *Société de physique* de Londres, une conférence sur un mode de production de la rotation du disque d'Arago, en employant des électro-aimants fixes. Les courants alternatifs, décalés d'un quart de période, étaient produits par une pile et un commutateur spécial et les deux électro-aimants étaient placés radialement à petite distance d'un disque dont ils provoquaient la rotation.

En 1880, M. Marcel Desprez avait essayé des moteurs biphasés : l'un d'eux, de 1/8 de cheval, était à champ fixe, produit par un électro-aimant, entre les pôles duquel tournait une armature qui avait deux enroulements perpendiculaires parcourus par deux courants alternatifs décalés, de 1/4 de période.

En 1884, M. Ferraris construisit un moteur biphasé et donna la théorie des champs magnétiques tournants.

En 1888, M. Tesla, qui ne connaissait pas les travaux de M. Ferraris,

Digitized by Google

prit un grand nombre de brevets relatifs aux moteurs polyphasés; il construisit des moteurs biphasés, mais cependant, dans un de ses brevets, il décrit un moteur triphasé avec montage en étoile.

Puis vinrent les travaux de MM. Hutin et Leblanc, Wenstrôm, von Dolivo Dobrowolski, Brown, etc., et lors de l'exposition de Francfort, en 1891, les expériences de transmission de l'énergie, au moyen de courants polyphasés, entreprises par « l'Allgemeine Elektricitæts Gesellschaft » et la Société d'Oerlikon, dont les résultats furent si brillants, donnèrent une grande impulsion à l'emploi des courants polyphasés, qui tendent de plus en plus à se répandre.

Depuis longtemps déjà, on s'occupait des moteurs asynchrones à courant monophasé, qui, il est vrai, ne peuvent démarrer seuls, mais dans lesquels les dispositifs de démarrage sont très simples.

En 1889, M. Elihu Thomson avait exposé à Paris un de ces moteurs. MM. Hutin et Leblanc en avaient construit un dont ils donnèrent la description dans une note parue en 1891.

Les récents travaux de MM. Brown, Dobrowolski, Kolben, Hutin et Leblanc, etc..., ont rendu ces moteurs tout à fait pratiques.

Afin de faciliter l'étude pratique des moteurs à courant alternatif, nous les classerons en deux grandes catégories : 1° les moteurs synchrones ; 2° les moteurs asynchrones.

Les moteurs synchrones se subdivisent en moteurs monophasés ou à courant alternatif simple, et en moteurs polyphasés.

Dans les moteurs asynchrones, nous étudierons d'abord les moteurs polyphasés, qui sont entrés dans la pratique bien avant les moteurs monophasés.

§ 3. — MOTEURS SYNCHRONES MONOPHASÉS OU A COURANT ALTERNATIF SIMPLE.

Les moteurs les plus employés sont à excitation indépendante (1er volume, page 223), ou à champ constant. Il existe aussi des petits moteurs à champ de direction constante, obtenu en redressant le courant dans les inducteurs (1er volume, page 224).

Digitized by Google

Moteurs à champ constant.

Tout alternateur, amené préalablement au synchronisme, continue à tourner comme moteur, s'il est alimenté par un alternateur de fréquence voulue. Le nombre de tours par minute est donné par la relation :

$$N = \frac{60\ F}{M}$$

F étant la fréquence du courant, M le nombre de champs de même sens du moteur. (Voir le tableau page 95 en y faisant C = M.)

Il faut donc mettre le moteur en marche et l'amener au synchronisme, avant d'y appliquer la charge.

Pour les petits moteurs, on peut les amener à la vitesse du synchronisme à la main.

Pour les moteurs de grande puissance, il faut avoir recours à des artifices de démarrage.

On peut, par exemple, avoir une batterie d'accumulateurs, chargée par la dynamo excitatrice (actionnée par le moteur) pendant la marche. Au démarrage on fait, au moyen du courant fourni par cette batterie, fonctionner le moteur à courant continu, jusqu'à ce qu'il ait acquis la vitesse de synchronisme.

On peut également monter sur l'arbre du moteur, un petit moteur asynchrone monophasé qui l'entraîne au démarrage.

Ce dernier système a été employé par la Société d'Oerlikon, pour un moteur de 90 chevaux, installé dans un moulin à Coire. Le moteur asynchroné auxiliaire a une puissance de 9 chevaux. Quand le synchronisme est atteint, on charge le moteur avec toute la transmission du moulin. Malgré la variation de la charge, le moteur n'a jamais été désynchronisé, et le nombre de tours est absolument constant.

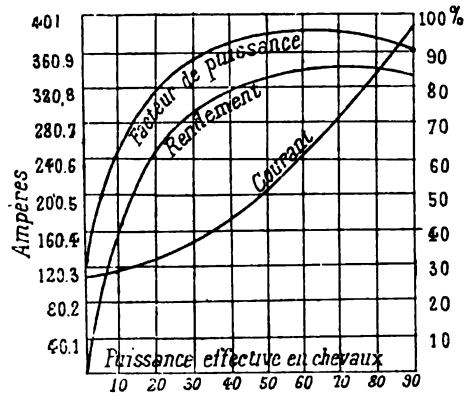


Fig. 134

Le rendement de ces moteurs est très bon; la figure 134 donne la courbe du rendement, de l'intensité efficace et du rap-

Digitized by Google

port des watts vrais aux watts apparents, ou du facteur de puissance $\left(\frac{E I \cos \varphi}{E I} = \cos \varphi\right)$ aux diverses charges, pour un moteur de 80 chevaux du type Kapp-Oerlikon.

L'étude graphique d'après la méthode de M. Blakeslay, permet de bien se rendre compte des conditions de fonctionnement d'un moteur synchrone.

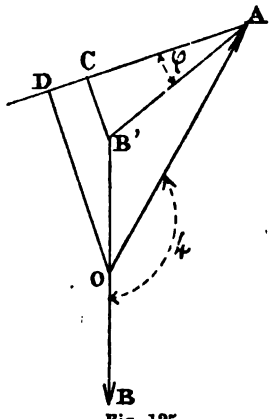


Fig. 135

OA, représente (fig. 135) la f. e. m. appliquée aux bornes du moteur; on a si E_a est sa valeur maximum :

$$E_a = m\ OA$$

Si OB représente la f. contre. e. m. du moteur, faisant avec la f.e.m. appliquée l'angle ψ, on a :

$$E_c = m\ OB$$

Si nous prenons OB' = OB. B'A représente en grandeur et en direction la résultante, et on a :

$$E_r = m\ B'A$$

Si L est le coefficient de s. i. du moteur, r la résistance de l'armature, et si $\text{tg}\ \varphi = \frac{k L}{r}$, en prenant l'angle $B'AC = \varphi$ et en abaissant de B' la perpendiculaire B'C sur AC, on aura :

$$E_s = m\ B'C$$

E_s étant la valeur maximum de la f. e. m. de s. i. CA représente la f. e. m. effective (celle qui est en concordance de phase avec le courant) Si I est l'intensité maximum du courant, on aura :

$$I = \frac{E_e}{r} = \frac{m\ CA}{r}$$

La puissance fournie au moteur est :

$$P_a = E_{a_{eff}} I_{eff} \cos DAO = \frac{E_a I}{2} \cos DAO$$

En abaissant de O, la perpendiculaire OD sur CA, on a :

Digitized by Google

$$\cos DAO = \frac{DA}{OA} \qquad E_a = m\,OA \qquad I = \frac{m}{r}\,CA$$

$$P_a = \frac{m^2}{r}\,OA.\,CA.\,\frac{DA}{OA} = \frac{m^2}{2r}\,DA.\,CA$$

La puissance perdue ou transformée en chaleur est :

$$P_p = r\,I^2_{eff} = r\,\frac{I^2}{2} = \frac{m^2 r}{2r^2} \quad \overline{CA}^2 = \frac{m^2}{2r}\,\overline{CA}^2$$

La puissance utile est :

$$P_u = E_{c_{eff}}\,I_{eff}\cos(CA, OB)$$

Comme OD est perpendiculaire à CA, on a :

$$\cos(CA, OB) = \sin B'OD = \frac{DC}{OB'}$$

$$E_{c_{eff}} = \frac{E_c}{\sqrt{2}} = m\,\frac{OB}{\sqrt{2}}$$

$$I_{eff} = \frac{I}{\sqrt{2}} = \frac{m}{r}\,\frac{CA}{\sqrt{2}}$$

$$P_u = \frac{m^2}{2r}\,OB.\,CA.\,\frac{DC}{OB'} = \frac{m^2}{2r}\,DC.\,CA$$

Il est facile de vérifier que l'on a :

$$P_u = P_a - P_p = \frac{m^2}{2r}\left\{ DA.\,CA - CA^2 \right\}$$

$$P_u = \frac{m^2}{2r}\,(DA - CA)\,CA = \frac{m^2}{2r}\,DC.\,CA.$$

On voit donc que :

1° La puissance fournie au moteur est proportionnelle à :

$$DA.\,CA$$

2° La puissance perdue à :

$$\overline{CA}^2$$

3° La puissance utile à :

$$DC.\,CA$$

Digitized by Google

Le rendement sera :

$$\frac{DC.CA}{DA.CA} = \frac{DC}{DA}$$

On peut étudier les variations de ces diverses valeurs, la valeur de la f. e. m. appliquée aux bornes étant donnée, ainsi que la force contre. e. m., supposée constante.

Le lieu des points tels que D est un cercle ayant AO pour diamètre. Le lieu des points tels que B', un cercle de centre O (fig. 136).

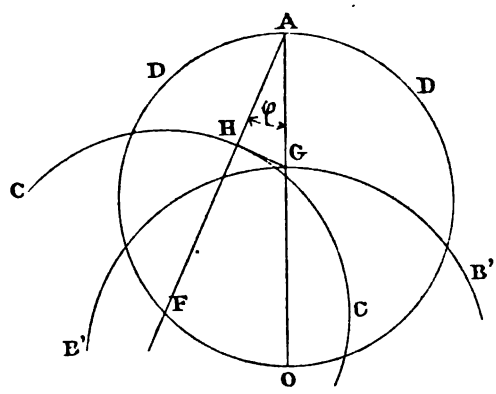


Fig. 136

Pour trouver le lieu des points tels que C, prenons l'angle $FAO = \varphi$, et de G, point de rencontre du cercle B' avec AO, abaissons la perpendiculaire GH sur AF; il est facile de démontrer que le cercle de centre F et de rayon FH est le lieu des points C.

Il est facile de voir que l'intensité du courant sera minimum, quand son maximum sera représenté par AH $\left(I_{min} = \frac{m}{r} AH\right)$ c'est-à-dire quand la f. contre électro-motrice sera justement opposée à la f. e. m. appliquée ($\psi = 180°$).

En 1890, à Cassel, où des moteurs synchrones alimentés par des alternateurs placés en dehors de la ville, actionnent des dynamos assurant l'éclairage, on s'aperçut que pour une même puissance fournie, l'intensité efficace du courant d'armature variait avec l'intensité du courant d'excitation

Comme le montrent les courbes de la figure 137, relevées par M. Mordey sur deux de ses moteurs synchrones, donnant à puissance

Digitized by Google

constante, l'intensité du courant d'armature en fonction du courant d'excitation, pour une certaine valeur du courant d'excitation l'in-

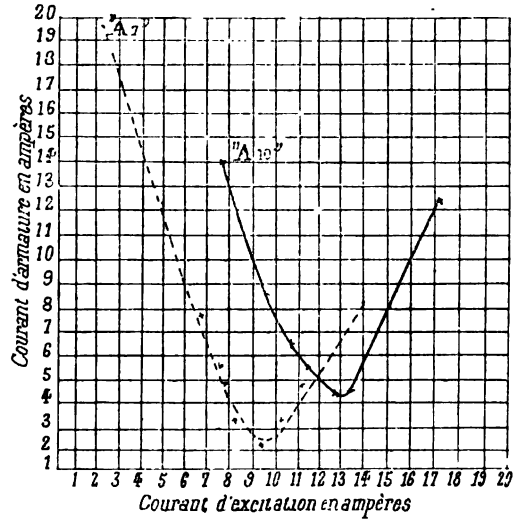


Fig. 137

tensité du courant d'armature est minimum et si on augmente ou si on diminue l'excitation, l'intensité du courant d'armature croît. Cet effet est beaucoup plus marqué à faible charge du moteur que pour des charges élevées. M. Mordey a trouvé que l'excitation qui donne le courant minimum est à peu près la même à toute charge, (cela vient de ce que ses moteurs ont une très faible s. i.). Quand la s. i. est plus grande, l'intensité du courant d'excitation donnant le courant minimum croît légèrement avec la charge.

Si l'on examine le décalage entre le courant d'armature et la f. e. m. appliquée, on constate que d'abord le courant est décalé en arrière, puis qu'en augmentant le courant d'excitation, le décalage décroît, qu'il devient nul quand le courant d'armature a une intensité efficace minimum, puisqu'il change ensuite de sens (c'est-à-dire que le courant est alors en avance sur la f. e. m.), et augmente à mesure que l'intensité du courant d'excitation augmente.

On peut donc en faisant varier l'excitation d'un moteur synchrone, faire varier le décalage sur une ligne, c'est-à-dire que le moteur peut jouer un rôle analogue à celui d'un condensateur et que l'on peut

Digitized by Google

en profiter pour augmenter la capacité d'une distribution dans une certaine mesure, c'est-à-dire diminuer la résistance apparente.

On peut donner l'explication suivante de la variation du décalage d'un moteur.

En étudiant la réaction d'armature d'un moteur de la même manière que nous l'avons fait pour un alternateur (page 14), il est facile de voir qu'un décalage du courant en arrière de la f. e. m. augmente l'intensité du champ magnétique tandis qu'un décalage du courant en avant diminue l'intensité de ce champ.

Si donc, l'excitation d'un moteur est trop faible pour créer la force contre e. m. nécessaire, le courant de l'induit doit concourir au renforcement du champ et il sera alors retardé par rapport à la f. e. m., si au contraire le moteur est surexcité, c'est-à-dire excité de manière à produire une force contre e. m. trop forte, il faut que le courant d'armature ait une action démagnétisante et soit en avance sur la f. e. m.

On peut calculer assez approximativement (1) les ampères-tours à ajouter à l'excitation pour annuler un décalage donné, d'après la formule de M. Kapp (page 17) on a :

$$X_b = 0{,}0156\, n\, \varphi^\circ\, I$$

φ° étant l'angle de décalage, exprimé en degrés, et I l'intensité efficace, que l'on peut déduire de la relation

$$I\, E_a \cos \varphi = P$$

E_a étant la f. e. m. efficace aux bornes du moteur et P la puissance.

Si l'on veut amener un décalage en avance de φ_1°, il faudra ajouter aux ampères-tours, calculés comme il est indiqué ci-dessus, les ampères-tours calculés d'après la relation.

$$X'_b = 0{,}0156\ n\ \varphi_1^\circ\, I_1$$

I_1 étant donné par la relation.

$$L\, E_a \cos \varphi_1 = P$$

A la suite du rapport de M. Forbes, sur l'utilisation des chutes du Niagara accordant la préférence aux moteurs à courants biphasés

1. M. Blondel, professeur à l'école des Ponts et Chaussées a publié une brochure sur la théorie complète des moteurs synchrones (simples et polyphasés) dans laquelle il étudie graphiquement la question, cette brochure a été reproduite en partie par l'*Industrie Électrique*.

Digitized by Google

asynchrones (voir page 73) sur les moteurs synchrones monophasés, il s'est élevé une discussion au sujet du transport de l'énergie par moteurs synchrones à travers une ligne présentant une certaine résistance.

M. Mordey a alors entrepris des expériences (1) avec des moteurs synchrones type Mordey-Victoria.

Il résulte de ces expériences, que l'on peut intercaler dans le circuit une résistance considérable, même beaucoup plus élevée que celle qu'il serait économique d'admettre pour une transmission d'énergie, avant que le moteur ne se mette hors de phase.

M. Boucherot a pu dans des expériences faites avec des alternateurs biphasés synchrones, qui fonctionnent dans les mêmes conditions que les alternateurs monophasés, obtenir le synchronisme en charge en admettant une perte en ligne de 40 %; au delà ils se décrochaient.

Moteurs à champ redressé.

La maison Ganz construit des moteurs synchrones de faible puissance, dont les inducteurs sont excités par le courant redressé (voir page 32), qui peut être emprunté soit directement à la ligne, quand le voltage est faible, soit au secondaire d'un transformateur.

Le redresseur de courant est le même que celui décrit page 32, les inducteurs sont mis en court circuit au moment où se produit l'interversion du courant. A la mise en train (2), par suite de la paresse magnétique des noyaux, les inducteurs ne s'exciteraient pas suffisamment, pour donner un couple initial capable de provoquer la marche synchrone. On soulève alors un des balais de chaque paire, et il se produit des étincelles; lorsque la marche synchrone est atteinte on laisse retomber les balais. La maison Ganz a réalisé dans ce but un dispositif automatique, au moyen d'un régulateur, qui ne laisse retomber les balais que lorsque ses boules sont suffisamment écartées.

Une commission nommée par la ville de Francfort, a exécuté de nombreuses expériences sur des moteurs Ganz à excitation par courant redressé.

Un moteur de 25 chevaux nominaux a donné des rendements in-

1. Voir un article de M. Berthon, paru dans l'*Électricien* du 14 avril 1894.
2. Eric Gérard *Leçons sur l'électricité.*

Digitized by Google

dustriels variant de 82 à 88 %, il doit être mis en marche à la main sans charge. Une fois la vitesse de régime atteinte, ce qui exige au plus une minute, on peut appliquer au moteur sans qu'il cale un effort correspondant à 26 chevaux; après celà on peut accroître progressivement la charge jusqu'à ce que la puissance fournie soit de 40 chevaux, soit 60 %, en plus de puissance nominale. Lors de la mise en train les étincelles atteignent 5 c. m. de longueur, mais cela est de peu d'importance pour l'usure du collecteur.

La commision de l'exposition de Francfort (1), en 1891, a procédé à des essais sur trois moteurs du type Ganz, de 10 chevaux, 1 cheval et 1/2 cheval, exposés par la société Hélios de Cologne.

La puissance fournie aux moteurs, était mesurée au moyen d'un wattmètre et la puissance utile au moyen d'un frein.

Le moteur de 10 chevaux à 6 pôles a fonctionné sous une différence de potentiel efficace de 1000 volts, sa vitesse était de 833 tours. Le moteur démarrait automatiquement à vide avec de fortes étincelles et atteignait la vitesse du synchronisme en un quart de minute; les étincelles cessaient lorsque la vitesse de synchronisme était atteinte.

Le rendement mesuré était d'environ 80 %, mais il y a lieu de remarquer que la poulie de frein chauffait pendant les expériences, ce qui a élevé la température des paliers et par conséquent diminué le rendement.

Le moteur de 1 cheval à 4 pôles, fonctionnait sous une tension

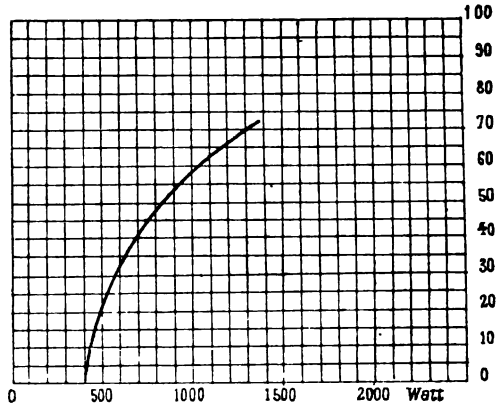


Fig. 138

efficace de 105 volts à la vitesse de 1.250 tours. Sur sept essais, le

1. *Rapport officiel.*

Digitized by Google

moteur démarra seul deux fois, étant muni de la poulie de frein, ce qui correspondait à un couple résistant égal à 0,142 du couple normal au synchronisme et trois fois avec la poulie de frein chargée de 0,5 kg., ce qui correspondait à 0,360 du couple normal.

La courbe de la figure 138, donne le rendement de ce moteur à diverses puissances.

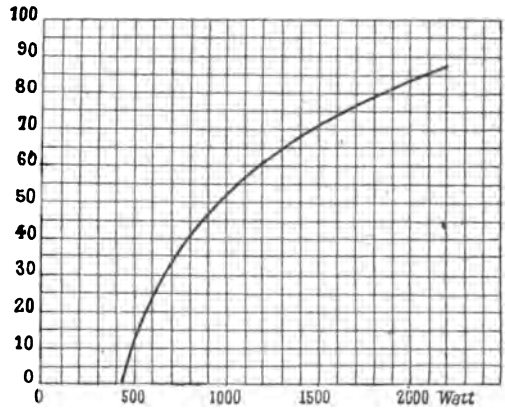


Fig. 139.

Le moteur d'un 1/2 cheval, à 4 pôles, fonctionnait sous une tension efficace de 105 volts, on a constaté les mêmes faits que pour le moteur de 1 cheval ; à la charge maximum de la poulie avec 2,327 kg, ce qui correspond à une puissance de 1,075 cheval, c'est-à-dire à plus du double de la puissance normale, le moteur cala deux fois sur trois essais. La courbe de la figure 139, donne le rendement de ce moteur à diverses puissances.

§ 4. — MOTEURS SYNCHRONES POLYPHASÉS OU A CHAMP TOURNANT

Tout alternateur polyphasé, peut fonctionner comme moteur synchrone. L'avantage sur les moteurs synchrones monophasés est que le moteur peut démarrer automatiquement et que le couple moteur est constant au lieu d'être oscillatoire.

Comme dans les moteurs monophasés, le décalage entre la f. e. m.

Digitized by Google

et le courant dépend de l'excitation du moteur. Le problème se traite comme dans le cas étudié page 122, en ne considérant qu'une phase.

Les moteurs synchrones polyphasés peuvent donc jouer un rôle analogue à celui des condensateurs, en annulant tout décalage.

La maison Lahmeyer, de Francfort, a appliqué ce principe à la distribution par courants triphasés de la ville de Bockenheim, où des moteurs asynchrones sont actionnés par des courants triphasés à 600 volts. L'emploi de moteurs triphasés synchrones, fonctionnant à vide, a permis d'annuler presque complètement le décalage, et de doubler ainsi la puissance des génératrices.

Moteur Hutin et Leblanc. — Dans leur système de transformation des courants polyphasés en courant continu (1er volume, page 213), MM. Hutin et Leblanc emploient pour actionner les commutateurs tournants des moteurs synchrones.

Le moteur, quand il est bipolaire a l'aspect d'une dynamo Manchester, les inducteurs sont alimentés par le courant fourni par une batterie d'accumulateurs ou par la dynamo génératrice. L'induit mobile est alimenté par les courants polyphasés et est enroulé en tambour de manière à produire un champ bipolaire.

Comme le synchronisme doit être assuré d'une manière parfaite, MM. Hutin et Leblanc ont adopté le dispositif suivant :

Les pièces polaires sont perforées aussi près que possible de l'entrefer, pour recevoir des barres de cuivre, qui sont reliées par une bague à chacune des extrémités, de manière à former une sorte de cage d'écureuil.

Tant que le moteur tourne synchroniquement, le champ reste fixe dans l'espace. Si il y a décrochage, soit en avant, soit en arrière, le champ se déplace, de sorte que des courants énergiques sont induits dans les barres de l'amortisseur en cage d'écureuil, et s'opposent au décrochage. Le moteur fonctionne d'une manière très régulière et le synchronisme est parfait.

En surexcitant le moteur, MM. Hutin et Leblanc arrivent à mettre les courants en phase avec les f. e. m. de sorte que lorsque les commutateurs interrompent les divers circuits, il ne se produit pas d'étincelles.

Moteur Schuckert. — Le moteur Schuckert est constitué comme l'alternateur que nous avons décrit (page 81, fig. 101), le moteur biphasé

Digitized by Google

est muni de quatre bagues pour recevoir les courants alternatifs, et un collecteur permet de recueillir le courant continu nécessaire à l'excitation,

On ne peut exciter le moteur avant qu'il ait atteint sa marche synchrone, sans celà il s'arrêterait.

Pour la mise en marche, on ouvre le circuit d'excitation, puis on envoie le courant biphasé dans l'anneau. Le moteur fonctionne alors comme un moteur asynchrone, dont l'induit est simplement constitué par des pièces de fer, il démarre seul et prend bientôt une vitesse suffisamment voisine du synchronisme pour qu'il puisse tourner quand les électros sont excités.

On doit donc pouvoir reconnaître le moment où le synchronisme est près d'être atteint; car si l'on ferme trop tôt le circuit d'excitation le moteur s'arrête. On se sert, à cet effet, d'un voltmètre placé en dérivation aux extrémités du circuit d'excitation.

Tant que le synchronisme n'est pas atteint, le champ tourne dans l'espace (avec une vitesse égale à la différence de vitesse du champ et de l'anneau), les pièces polaires sont soumises à des effets d'induction, de sorte que l'aiguille du voltmètre oscille. Quand le synchronisme est atteint, le champ est fixe dans l'espace et l'aiguille du voltmètre immobile.

La maison Schuckert a installé, à Buda-Pesth des moteurs synchrones actionnant directement des dynamos à courant continu fournissant le courant nécessaire à l'éclairage de la ville et alimentant une batterie d'accumulateurs (voir page 83).

L'inducteur est une couronne fixe, portant des électros-aimants, disposés radialement à l'intérieur.

L'induit tournant est un anneau muni d'un enroulement Gramme, recevant par l'intermédiaire de balais et de bagues, les courants biphasés à la tension de 1.800 volts.

Les moteurs de 120 k. w. ont huit pôles et tournent à la vitesse de 400 tours par minute, ceux de 240 k. w. ont seize pôles et tournent à 200 tours.

Le courant excitateur est fourni par la batterie d'accumulateurs.

A la mise en marche, le synchronisme est atteint, en faisant fonctionner la dynamo comme moteur, et en réglant son excitation. Une fois la vitesse de synchronisme atteinte (ce que l'on reconnait au

Digitized by Google

moyen d'un voltmètre, comme dans le cas de couplage en parallèle de deux alternateurs), on ferme le commutateur principal et le moteur continue à tourner en entrainant la dynamo.

Moteur Tesla.

Nous avons vu (1er volume, page 173) que M. Tesla, obtient deux courants décalés de $\frac{\pi}{2}$, en employant des transformateurs. La fig. 140 donne le schéma d'un moteur (1) synchrone Tesla bipolaire pour courants biphasés. A l'intérieur de l'anneau, muni d'un enroulement Gramme (page 109) se trouve un électro-aimant mobile, dont les extrémités de l'enroulement aboutissent à deux bagues isolées sur lesquelles frottent deux balais b, b'.

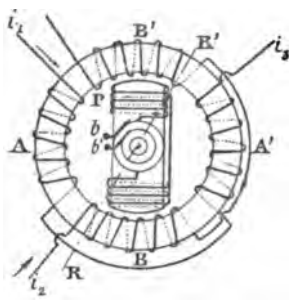


Fig. 140

Au démarrage, l'enroulement de l'électro-aimant est fermé, soit en court circuit, soit sur une résistance convenable, et le moteur démarre comme un moteur asynchrone, mais si le couple résistant n'est pas trop élevé, le moteur atteint bientôt la vitesse du synchronisme et la conserve.

L'électro-aimant fait alors avec le champ, en arrière, un angle dont la grandeur dépend du couple résistant. Dans ce cas, si pour une raison quelconque, l'angle de retard venait à s'accroitre, l'enroulement de l'induit réagirait pour accroitre le champ et par suite le couple moteur.

Dans les moteurs Tesla multiphasés, si le nombre des pôles du champ est 2 p, l'armature comporte 2 p saillies polaires munies d'enroulements.

Les enroulements peuvent être fermés sur eux-mêmes, mais la puissance du moteur est de beaucoup augmentée si on les alimente par un courant continu, de sorte que la polarité reste constante.

5. — THÉORIE DES MOTEURS ASYNCHRONES

Dans le premier volume, nous avons donné la théorie des moteurs asynchrones, à champ tournant et à champ alternatif simple (que

1. *Les courants polyphasés*, par Rodet et Bousquet.

Digitized by Google

nous avons désignés sous le nom de moteurs à induit constitué par des circuits fermés), mais il s'est glissé dans les calculs quelques erreurs relativement à l'évaluation du couple moteur, de sorte qu'il nous a paru nécessaire de revenir sur cette étude. Du reste la nouvelle théorie que nous donnons ci-après est beaucoup plus simple que l'autre.

Cherchons d'abord à évaluer la puissance qu'il faut fournir à un induit formé de m spires ou cadres, disposés symétriquement autour d'un axe commun et faisant par conséquent entre eux des angles $\frac{\pi}{m}$, pour le faire tourner avec une vitesse angulaire k_1, dans un champ magnétique fixe d'intensité constante.

Soit B_0 l'intensité du champ S, r et l, la surface, la résistance et le coefficient de s. i. d'un cadre de l'induit.

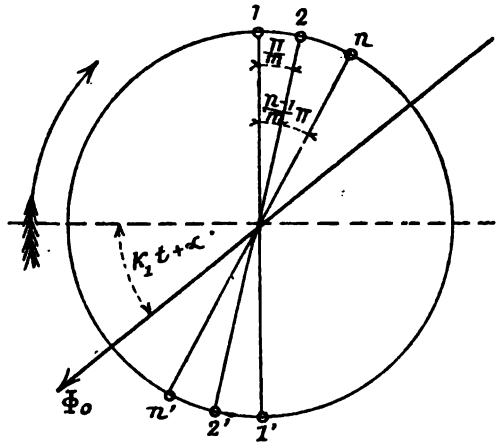


Fig. 141

Supposons l'induit tournant dans le sens de la flèche (fig. 141), la perpendiculaire au cadre 1, faisant à l'instant donné l'angle $k_1 t + \alpha$. avec le champ.

Le cadre n, fera l'angle :

$$k_1 t + \alpha + \frac{n-1}{m}\pi + \frac{\pi}{2}$$

Le flux traversant ce cadre, sera :

$$B_0 S \sin\left(k_1 t + \alpha + \frac{\pi}{2} + \frac{n-1}{m}\pi\right) = B_0 S \cos\left(k_1 t + \alpha + \frac{n-1}{m}\pi\right)$$

Digitized by Google

La f. e. m. induite dans ce cadre, sera :

$$e_n = k_1 \, B_o \, S \sin\left(k_1 \, t + \alpha + \frac{n-1}{m} \, \pi \right)$$

L'intensité du courant sera donnée par la relation :

$$i_n = \frac{k_1 \, B_o \, S}{r} \cos \varphi \sin\left(k_1 \, t + \alpha + \frac{n-1}{m} \, \pi - \varphi \right)$$

en prenant :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{k_1 \, m \, l}{2 r} = \frac{k_1 \, L}{r} \qquad (1^{er} \text{ volume pages } 153 \text{ et } 156).$$

en posant :

$$L = \frac{m \, l}{2}$$

La puissance électrique sera :

$$e_n \, i_n = \frac{k_1^2 \, B_o^2 \, S^2}{r} \cos \varphi \, \sin\left(k_1 t + \alpha + \frac{n-1}{m} \, \pi \right) \sin\left(k_1 t + \alpha + \frac{n-1}{m} \, \pi - \varphi \right)$$

Comme :

$$\sin a \, \sin b = \frac{1}{2} \left\{ \cos (a - b) - \cos (a + b) \right\}$$

on aura :

$$e_n \, i_n = \frac{k_1^2 \, B_o^2 \, S^2}{2 r} \cos \varphi \left\{ \cos \varphi - \cos\left(2 \, k_1 \, t + 2 \, \alpha + \frac{2(n-1)}{m} \, \pi - \varphi \right) \right\}$$

La puissance électrique totale, sera la somme des puissances dans les m cadres. En remarquant que la somme des cosinus de m angles, formant une progression arithmétique dont la raison est $\frac{2\pi}{m}$, est égale à zéro, on obtiendra la relation :

$$P = \Sigma \, p = \frac{m \, B_o^2 \, S^2}{2 r} \, k_1^2 \cos^2 \varphi$$

Comme :

$$\cos^2 \varphi = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}$$

$$P = \frac{m \, B_o^2 \, S^2}{2 r} \, \frac{1 \, k_1^2}{1 + \frac{k_1^2 \, L^2}{r^2}} = \frac{m \, B_o^2 \, S^2}{2} \, r \, \frac{k_1^2}{r^2 + k_1^2 \, L^2}$$

La puissance étant le travail dans l'unité de temps, peut être

Digitized by Google

exprimée par le produit du couple par la vitesse angulaire k_1, on aura donc :

$$C = \frac{m\ B_0^2\ S^2}{2}\ r\ \frac{k_1}{r^2 + k_1^2\ L^2} = \frac{m\ B_0^2\ S^2}{2\ r}\ k_1\ \cos^2\varphi$$

La puissance est exprimée en ergs par seconde et le couple en ergs, si toutes les autres valeurs sont exprimées en unités C. G. S.

Il est facile de voir que inversement, si un champ magnétique uniforme tourne avec une vitesse k_1 autour d'un induit constitué comme nous l'avons expliqué ci-dessus, il donnera naissance à un couple moteur dont l'expression vient d'être donnée.

Moteurs asynchrones à champ tournant.

Le champ uniforme tourne dans l'espace avec une vitesse k, égale à la vitesse angulaire ou pulsation du courant ($k = 2\pi F$) et l'induit avec une vitesse angulaire k', de sorte qu'en somme le champ tourne autour de l'induit avec une vitesse de $k_1 = (k - k')$.

D'après ce qui précède, le couple moteur sera :

$$C = \frac{m\ B_0^2\ S^2}{2}\ r\ \frac{k - k'}{r^2 + (k - k')^2\ L^2}$$

$$C = (k - k')\ \frac{m\ B_0^2\ S^2}{2\ r}\ \cos^2\varphi$$

La puissance du moteur ou le travail dans l'unité de temps, sera, puisque la vitesse angulaire est k' :

$$P = k'\ \frac{m\ B_0^2\ S^2}{2}\ r\ \frac{k - k'}{r^2 + (k - k')^2\ L^2}$$

que l'on peut mettre sous la forme :

$$P = k'\ (k - k')\ \frac{m\ B_0^2\ S^2}{2\ r}\ \cos^2\varphi$$

L'intensité du courant, dans la n^{me} spire de l'induit, est :

$$i_n = \frac{k_1\ B_0\ S}{r}\ \cos\varphi\ \sin\left(k_1\ t + \alpha + \frac{n-1}{m}\ \pi - \varphi\right)$$

L'intensité efficace du courant, qui est la même dans tous les cadres, sera :

$$i_{eff} = \frac{k_1\ B_0\ S}{\sqrt{2}\ r}\ \cos\varphi_1 = \frac{(k - k')\ B_0\ S}{\sqrt{2}\ r}\ \cos\ \varphi$$

Digitized by Google

La perte de puissance, par suite de la résistance des m cadres, sera :

$$P_p = m\, r\, i^2_{eff} = \frac{m\,(k - k')^2\, B_o^2\, S^2}{2\, r} \cos^2 \varphi$$

Si on ne tient compte que de la perte dans l'induit, le rendement sera :

$$R^t = \frac{P}{P + P_p} = \frac{k'\,(k - k')}{k'\,(k - k') + (k - k')^2} = \frac{k'}{k}$$

Il sera d'autant plus élevé que k' sera plus voisin de k, c'est-à-dire que le moteur tournera avec une vitesse se rapprochant du synchronisme.

Les expressions du couple et de la puissance peuvent être mises sous une autre forme. Si l'inducteur est formé de n cadres parcourus par des courants d'intensité maximum I, on aura (1er volume, pages 152 et 156) :

$$B_o = \frac{n\,\Phi''}{2}\, I$$

Φ'' étant l'intensité du champ créé par un courant d'intensité égale à l'unité circulant dans un cadre de l'inducteur. $\Phi''\,S$ sera le coefficient d'induction mutuelle d'un cadre de l'induit et d'un cadre de l'inducteur supposés placés dans un même plan ; si on désigne ce coefficient par M, on aura :

$$C = (k - k')\, \frac{m\, n^2}{8r}\, M^2 \cos^2 \varphi\, I^2$$

$$C = \frac{m\, n^2}{8}\, M^2\, r\, \frac{k - k'}{r^2 + (k - k')^2\, L^2}\, I^2$$

Les courants circulant dans l'induit donnent naissance à un champ tournant avec la même vitesse que le champ inducteur et faisant en arrière de celui-ci, un angle $\frac{\pi}{2} + \varphi$. L'intensité de ce champ est donnée par la relation :

$$B'_o = \frac{m\, B'}{2}\, X$$

Digitized by Google

B' étant l'intensité du champ créé par un courant d'intensité égale à l'unité circulant dans un cadre de l'induit, on a donc :

$$X = (k - k') \frac{B_o S}{r} \cos \varphi = (k - k') \frac{n M}{2r} \cos \varphi I$$

$$B'_o = (k - k') \frac{m n M}{4 r} B' \cos \varphi I$$

Supposons les n cadres de l'inducteur parcourus par des courants polyphasés de la première catégorie (1er volume, page 148), le p^{ième} cadre sera parcouru par un courant dont l'intensité sera :

$$i_p = I \sin \left(kt + \frac{p-1}{n} \pi \right)$$

Le champ inducteur fait avec ce cadre l'angle :

$$kt + \frac{p-1}{n} \pi$$

(1er volume, page 152), de sorte que le champ induit fait l'angle :

$$kt + \frac{p-1}{n} \pi - \frac{\pi}{2} - \varphi$$

Le flux de force, provenant de ce champ sera, si S est la surface d'un cadre inducteur :

$$B' S \sin \left(kt + \frac{p-1}{n} \pi - \frac{\pi}{2} - \varphi \right) = - B'_o S' \cos \left(kt + \frac{p-1}{n} \pi - \varphi \right)$$

et la force électromotrice induite :

$$e''_n = - k B'_o S' \sin \left(kt + \frac{p-1}{n} \pi - \varphi \right)$$

La f. e. m., appliquée aux bornes du circuit, sera :

$$e_n = E_o \sin \left(kt + \frac{p-1}{n} \pi + \theta \right)$$

La f. e. m. de s. i. sera si, l' étant le coefficient de s. i. d'un des cadres inducteurs, on pose $L' = \frac{nl'}{2}$ (1er volume, page 152) :

$$e'_n = - k L' I \cos \left(kt + \frac{p-1}{n} \pi - \varphi \right)$$

Digitized by Google

r' étant la résistance d'un cadre. En appliquant la loi de Ohm, on aura :

$$e_n + e'_n + e''_n = r' i_n$$

$$E_o \sin\left(kt + \frac{p-1}{n}\pi + \theta\right) = k\, B'_o\, S' \sin\left(kt + \frac{p-1}{n}\pi - \varphi\right) +$$

$$+ k\, L'\, I \cos\left(kt + \frac{p-1}{n}\pi\right) + r'\, I \sin\left(kt + \frac{p-1}{n}\right)$$

En faisant successivement dans cette relation, $kt + \frac{p-1}{n}\pi = o$ et $k_1 t + \frac{p-1}{n}\pi = \frac{\pi}{2}$, on aura deux équations permettant de déterminer θ et I, les deux inconnues (si E_o est donné), on aura :

$$E_o \sin\theta = k\, L'\, I - k\, B'_o\, S' \sin\varphi$$
$$E_o \cos\theta = k\, B'_o\, S' \cos\varphi + r'\, I$$

En remplaçant B'_o par la valeur donnée ci-dessus, et en remarquant que $B'\, S' = M$, coefficient d'induction mutuelle d'un cadre de l'inducteur et d'un cadre de l'induit, situés dans un même plan, on aura :

$$E_o \sin\theta = \left(k\, L' - k\,(k - k')\frac{m\,n}{4r}\, M^2 \sin\varphi\cos\varphi\right) I$$
$$E_o \cos\theta = \left(k\,(k - k')\frac{m\,n}{4r}\, M^2 \cos^2\varphi + r'\right) I$$

La puissance fournie au circuit est :

$$\frac{E_o\, I}{2}\cos\theta = \left(k\,(k - k')\,\frac{m\,n}{8r}\, M^2 \cos^2\varphi + \frac{r'}{2}\right) I^2.$$

La puissance totale fournie au moteur sera n fois plus forte, puisque il est constitué par n cadres.

$$P_a = n\,\frac{E_o\, I}{2}\cos\theta = \left(k\,(k - k')\,\frac{m\,n^2}{8r}\, M^2 \cos^2\varphi + \frac{nr'}{2}\right) I^2$$

La puissance utile est :

$$P_u = k'\, C = k'\,(k - k')\,\frac{m\,n^2}{8r}\, {}^2 \cos^2\varphi\, I^2$$

On voit que si r' est assez petit pour que l'on puisse négliger $nr'I^2$, le rendement sera :

$$R = \frac{k'}{k}$$

Digitized by Google

relation que nous avons déjà déduite d'autres considérations (page 132).

En élevant au carré et en additionnant les deux relations ci-dessus, et en admettant que $M = ll'$, c'est-à-dire que toutes les lignes de force créées par un cadre de l'inducteur passent dans un cadre de l'induit, on arrive à la relation :

$$I^2 = \frac{r^2 + (k - k')^2 L^2}{r^2 r'^2 + \{ (k - k') r' L + k r L' \}^2} E_0^2$$

Au démarrage, on a :

$$I^2 = \frac{r^2 + k^2 L^2}{r^2 r'^2 + k^2 \{ r' L + r L' \}^2} E_0^2$$

On retrouverait les mêmes relations en admettant que l'inducteur est composé de n cadres, faisant entre eux des angles égaux à $\frac{2\pi}{n}$ et parcourus par des courants polyphasés décalés de $\frac{2\pi}{n}$ d'un cadre à l'autre.

Le couple peut donc s'exprimer en fonction de E_0, valeur maximum de la f. e. m., appliquée aux bornes du moteur, par la relation :

$$C = \frac{mn^2}{8} M^2 r \frac{k - k'}{r^2 r'^2 + \{ (k - k') r' L + k r L' \}^2} E_0^2$$

et la puissance :

$$P = \frac{mn^2}{8} M^2 r \frac{k' (k - k')}{r^2 r'^2 + \{ (k - k') r' L + k r L' \}^2} E_0$$

L'angle du décalage de la f. e. m. et du courant, dans les circuits de l'inducteur (dont le cosinus est le facteur de puissance du moteur), sera trouvé en divisant l'une par l'autre les équations de la page 134. On aura, en posant $k - k' = k_1$:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{k L' - k k_1 \frac{mn}{4r} M^2 \sin \varphi \cos \varphi}{k k_1 \frac{mn}{4r} M^2 \cos^2 \varphi + r'}$$

comme :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{(k - k') L}{r} = \frac{k_1 L}{r}$$

Digitized by Google

$$\sin\varphi\cos\varphi = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{1+\operatorname{tg}^2\varphi} = \frac{k_1 r L}{r^2 + k_1^2 L^2}$$

$$\cos\varphi = \frac{r^2}{r^2 + k_1^2 L^2}$$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{k r^2 L' + k k_1^2 L^2 L' - k k_1^2 \frac{mn}{4} M^2 L}{k k_1 \frac{mn}{4} M^2 r + r^2 r' + k_1^2 r' L^2}$$

Comme, on a, à très peu de chose près :

$$M^2 = l l' \quad \text{et que} \quad L = \frac{m l}{2} \qquad L' = \frac{n l'}{2}$$

$$L L' = \frac{mn}{4} M^2$$

on aura :

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{k r^2 L'}{k k_1 r L L' + r^2 r' + k_1^2 r' L^2}$$

Moteur asynchrone à champ alternatif simple (ou monophasé).

Soit, $B_0 \sin kt$, l'intensité du champ inducteur à un instant donné et k' la vitesse angulaire de l'induit, supposé constitué comme nous l'avons indiqué.

Supposons que le champ fait à l'instant donné l'angle $k't + \alpha$, avec le cadre 1 et par conséquent l'angle $k't + \alpha + \frac{n-1}{m}\pi$ avec le n^{me} cadre.

Le flux traversant ce cadre sera :

$$N = B_0 S \sin kt \sin\left(k't + \alpha + \frac{n-1}{m}\pi\right)$$

ou en remarquant que :

$$\sin a \sin b = \frac{1}{2}\{\cos(a-b) - \cos(a+b)\}$$

$$N = \frac{B_0 S}{2}\left[\cos\left\{(k-k')t - \alpha - \frac{n-1}{m}\pi\right\} - \cos\left\{(k+k')t + \alpha + \frac{n-1}{m}\pi\right\}\right]$$

Il est facile de voir, que si l'on suppose l'induit fixe, les choses se passeront comme si l'on avait : 1° un champ d'intensité uniforme $\frac{B_0}{2}$,

Digitized by Google

tournant avec une vitesse $k - k'$ dans le sens de la flèche C (fig. 142) et faisant à l'instant donné l'angle $(k - k')\,t - \alpha$, avec la perpendiculaire au cadre 1.

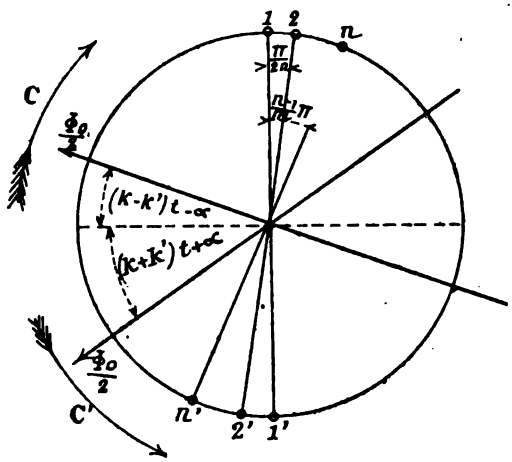


Fig. 142.

Ce champ fera avec le cadre n, l'angle

$$\frac{\pi}{2} - (k - k')\,t + \alpha + \frac{n-1}{m}\,\pi$$

de sorte que le flux, traversant ce cadre sera exprimé par la relation.

$$\frac{B_0\,S}{2}\sin\left\{\frac{\pi}{2} - (k-k')\,t + \alpha + \frac{n-1}{m}\,\pi\right\} = \frac{B_0\,S}{2}\cos\left\{(k-k')\,t - \alpha - \frac{n-1}{m}\,\pi\right\}$$

2° un second champ uniforme de même intensité $\frac{B_0}{2}$, faisant à l'instant donné l'angle $(k - k')\,t + \alpha$, avec la perpendiculaire au cadre 1, et tournant dans le sens inverse du champ précédent.

En effet ce cadre n, fait à l'instant t, avec le second champ l'angle.

$$(k + k')\,t + \alpha + \frac{\pi}{2} + \frac{n-1}{m}\,\pi$$

le flux qui le traverse est.

$$\frac{B_0\,S}{2}\sin\left\{(k+k')\,t + \alpha + \frac{\pi}{2} + \frac{n-1}{m}\,\pi\right\} = \frac{\Phi_0\,S}{2}\cos\left\{(k+k')\,t + \alpha + \frac{n-1}{m}\,\pi\right\}$$

Digitized by Google

Le couple agissant sur l'induit, sera égal à la différence des couples dus aux champs.

D'après ce qui précède, le couple dû au premier champ, pourra être exprimé par la relation :

$$C_1 = \frac{m\left(\frac{B_0}{2}\right)^2 S^2 r}{2} \frac{k - k'}{r^2 + (k - k')^2 L^2}$$

et le couple dû au second champ par :

$$C_2 = \frac{m\left(\frac{B_0}{2}\right)^2 S^2 r}{2} \frac{k + k'}{r^2 + (k + k')^2 L^2}$$

Le couple agissant sur l'induit sera exprimé par la relation.

$$C = \frac{m B_0^2 S^2 r}{8} \left\{ \frac{k - k'}{r^2 + (k - k')^2 L^2} - \frac{k + k'}{r^2 + (k + k')^2 L^2} \right\}$$

Comme l'induit tourne avec une vitesse angulaire k' la puissance du moteur sera :

$$P = k' m \frac{B_0^2 S^2 r}{8} \left[\frac{k - k'}{r^2 + (k - k')^2 L^2} - \frac{k + k'}{r^2 + (k + k')^2 L^2} \right]$$

en posant $L = \frac{ml}{2}$, l étant le coefficient de s. i. d'une spire de l'induit.

La f. e. m. agissant dans le n^me^ circuit, sera (voir page 136).

$$e_n = -\frac{dN}{dt} = \frac{B_0 S}{2} \left[\sin\left\{(k-k')t - \alpha - \frac{n-1}{m}\pi\right\} - \sin\left\{(k+k')t + \alpha + \frac{n-1}{m}\pi\right\} \right]$$

Si r est la résistance de la spire, en posant :

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{(k - k')\, ml}{2r} = \frac{(k - k')\, L}{r} \qquad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{(k + k')\, L}{r}$$

L'intensité du courant sera donnée par la relation :

$$\begin{aligned} i_n &= \frac{B_0 S}{2r} \left[(k - k') \cos \varphi_1 \sin\left\{(k - k')\, t - \alpha - \frac{n-1}{m}\pi - \varphi_1\right\} \right. \\ &\quad \left. - (k + k') \cos \varphi_2 \sin\left\{(k + k')\, t + \alpha + \frac{n-1}{m}\pi - \varphi_2\right\} \right] \\ &= \frac{B_0 S}{2r} \left[\left\{ (k - k') \cos \varphi_1 \sin \alpha - (k + k') \cos \varphi_2 \sin \beta \right\} \right] \end{aligned}$$

Digitized by Google

La valeur instantanée de la perte de travail, par suite de la résistance du circuit, sera :

$$ri^2_n = \frac{B_o^2 S^2}{4 r}\Big[(k-k')^2 \cos^2\varphi_2 \sin^2\alpha - 2(k-k')(k+k')\cos\varphi_1\cos\varphi_2 \sin\alpha\sin\beta + (k+k')^2\cos^2\varphi_2\sin^2\beta\Big]$$

Comme :

$$\sin^2 a = \frac{1}{2}(1-\cos 2a)$$

$$\sin a \sin b = \frac{1}{2}\{\cos(a-b) - \cos(a+b)\}$$

si l'on fait la somme des valeurs telles que ri^2_n, pour les n cadres en se rappelant que la somme de cosinus de m angles formant une progression arithmétique dont la raison est $\frac{2\pi}{m}$ est égale à zéro, on aura :

$$\Sigma ri_n^2 = \frac{B_o^2 S^2}{8 r}\{\cos^2\varphi_1 + \cos^2\varphi_2\}$$

La valeur instantanée du travail perdu dans l'induit est constante et égale à la puissance perdue, on aura donc :

$$P_p = \frac{B_o^2 S^2 r}{8}\left\{\frac{(k-k')^2}{r^2+(k-k')^2 L^2} + \frac{(k+k')^2}{r^2+(k+k')^2 L^2}\right\}$$

Le rendement en ne considérant que la perte dans l'induit sera.

$$R^t = \frac{P}{P+P_p}$$

en remplaçant P et P_p par leurs valeurs et en effectuant les opérations, on aura finalement :

$$R^t = \frac{k'^2}{k^2}\cdot\frac{k^2 L^2 - k'^2 L^2 - r^2}{k^2 L^2 - k'^2 L^2 + r^2}$$

Comme r est généralement très faible, on peut admettre que le rendement est égal à $\frac{k'}{k}$.

L'induit, comme nous l'avons vu est soumis à l'influence de deux champs, l'un moteur, tournant autour de lui dans le même sens avec une vitesse $k-k'$, ce champ tourne donc dans l'espace avec une vitesse k.

Digitized by Google

L'autre champ qui s'oppose au mouvement, tourne en sens inverse, avec une vitesse $k + k'$ par rapport à l'induit, et une vitesse $k + k' - k'$, $= k$ dans l'espace.

La réaction d'induit donne donc naissance également à deux champs, tournant en sens inverse, avec la vitesse k, dans l'espace.

§ 6. — MOTEURS ASYNCHRONES A CHAMP TOURNANT.

Comme nous l'avons vu (page 132) le rendement, (si l'on ne considère que la perte dans l'induit) est exprimé par $\frac{k'}{k}$, il est d'autant plus elevé que la vitesse k', du moteur se rapproche de celle du synchronisme k.

$k - k' = k_1$, s'appelle le *glissement* et le rapport $\frac{k - k'}{k}$ *le coefficient de glissement.*

En pratique, on a ordinairement :

$$k_1 = 0{,}02 \text{ à } 0{,}06\ k$$
$$k' = k - k_1 = 0{,}94 \text{ à } 0{,}98\ k$$

Le couple moteur et la puissance sont proportionnels à M^2, c'est-à-dire au carré du coefficient d'induction mutuelle, d'un cadre de l'induit et d'un cadre de l'inducteur, placés dans un même plan.

Il y a donc lieu d'éviter autant que possible la dispersion des lignes de force de l'inducteur, en faisant l'entrefer aussi petit que possible.

On peut avoir deux sortes de distribution.

1° La f. e. m. efficace appliquée aux bornes du moteur est constante, c'est le cas le plus général de la pratique.

2° L'intensité efficace des courants dans l'inducteur est constante.

F. e. m. efficace constante aux bornes du moteur.

Le couple est donné par la relation :

$$C = \frac{m n^2}{8} M^2 r \frac{k_1}{r^2 r'^2 + \{k_1 r' L + k r L'\}^2} E_0^2$$

Digitized by Google

Si on cherche la valeur de r rendant le couple maximum, pour une valeur k_1, donnée du glissement, on a :

$$r^2 = \frac{k_1^2 r'^2 L^2}{r'^2 + k^2 L'^2}$$

Si le couple doit être maximum au démarrage on doit avoir :

$$r^2 = \frac{k^2 r'^2 L^2}{r'^2 + k^2 L'^2}$$

Il est facile de voir que si on a :

$$r^2 > \frac{k^2 r'^2 L^2}{r'^2 + k^2 L'^2}$$

Le couple sera encore maximum au démarrage, on aura une courbe de la forme 1 (fig. 143).

Si on a :

$$r^2 = \frac{k^2 r'^2 L^2}{r'^2 + k^2 L^2}$$

la tangente à la courbe, au point correspondant au démarrage sera horizontale (courbe 2, fig. 143).

Si on a :

$$r^2 < \frac{k^2 r'^2 L^2}{r'^2 + k^2 L^2}$$

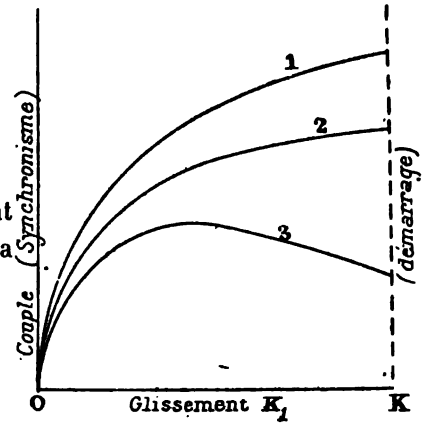


Fig. 143

la courbe aura la forme indiquée en 3 (fig. 143).

Si la résistance des spires de l'induit est calculée pour donner un couple maximum, quand le moteur travaille à pleine charge (k' voisin de k) pour augmenter le couple au démarrage, on pourra augmenter r, résistance d'une spire de l'induit.

Comme en pratique on fait tourner le moteur à une vitesse k' voisine de k, c'est-à-dire que k_1 est voisin de o, on voit qu'un ralentissement causé par une surcharge brusque du moteur (qui diminue k' et augmente k_1) a pour effet, d'augmenter la valeur du couple et que le moteur ne cale pas tant que cette surcharge n'est pas exagérée,

Digitized by Google

c'est donc une seconde raison pour donner au moteur une vitesse voisine du synchronisme.

L'intensité maximum des courants dans l'inducteur est donnée par la relation.

$$I^2 = \frac{r^2 + k_1^2 L^2}{r^2 r'^2 + \{k_1 r' L + k r L'\}^2} E_0^2$$

En prenant la dérivée par rapport à k_1, on voit que son signe varie comme

$$k_1^2 r' L^2 + k k_1 r L L' - r^2$$

Pour $k_1 = o$, la dérivée est négative.

Si k_1 augmente, la dérivée passe par o pour une valeur de k_1 donnée par la relation:

$$k_1 = r \frac{\sqrt{k^2 L'^2 + 4 r'} - k L'}{2 r' L}$$

On peut donc construire des moteurs, pour lesquels l'intensité efficace au démarrage est minimum il suffit de donner à r, une valeur assez forte pour que k_1 déterminé par la relation ci-dessus soit égale à k. On pourra aussi déterminer r de manière, que l'intensité au démarrage soit égale à l'intensité à pleine charge, l'intensité étant minimum pour une charge intermédiaire.

Dans de tels moteurs, le couple et la puissance à pleine charge sont faibles, le moteur aura donc un grand poids pour une faible puissance.

Pour augmenter la puissance à pleine charge (pour k_1 très faible) il faut faire r très petit, dans ce cas, on a une intensité minimum dans les inducteurs pour une valeur très faible de k_1 valeur que l'on ne peut atteindre en pratique, car à cause des résistances passives k' diffère toujours de k. Pratiquement donc dans de tels moteurs l'intensité efficace dans les inducteurs augmente avec k_1 et est maximum pour $k_1 = k$, c'est-à-dire au démarrage. Elle peut alors atteindre une valeur trop élevée et amener des pertubations dans le réseau de distribution.

On peut alors diminuer l'intensité au démarrage.

1° en augmentant r' ou L' qui interviennent seulement au dénomi-

Digitized by Google

nateur de la relation donnant la valeur de I^2 en fonction de E_0^2. on emploie à cet effet des rhéostats ou des bobines de s. i. qu'on intercale dans les circuits inducteurs.

Comme dans ces moteurs à faible résistance d'induit, le couple est déjà faible au démarrage on le diminue encore (r' et L' entrant également au dénominateur dans la relation donnant la valeur du couple en fonction de E_0), de sorte que l'on peut arriver à avoir un couple trop faible, dans certaines conditions.

2° On peut augmenter r la résistance de l'induit au moyen d'un rhéostat, dans ce cas sous certaines conditions on augmente la valeur du couple au démarrage. Nous verrons plus loin les inconvénients de ce dispositif en pratique.

On a l'avantage dans ce cas de pouvoir faire varier la vitesse du moteur en faisant varier la résistance, comme il est facile de le voir, en examinant les formules.

M. Boucherot a combiné un dispositif, permettant d'obtenir un courant d'intensité élevée dans les inducteurs, sans que le courant de ligne atteigne une intensité trop forte; nous étudierons plus loin ce dispositif.

L'angle de décalage dans les inducteurs est donné par la relation :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{k\, r^2\, L'}{k\, k_1\, r\, L\, L' + k_1^2\, r'\, L^2 + r^2\, r'}$$

θ diminue donc quand k_1 augmente.

Dans les limites pratiques de fonctionnement d'un moteur k_1 augmente avec la puissance, donc le décalage diminue, et le facteur de puissance ($\cos \theta$) augmente avec la charge, ce qu'il est facile de voir en examinant les courbes relevées sur divers moteurs, que nous donnons plus loin.

Intensité efficace constante dans les circuits inducteurs.

Dans ce cas, qui se présente très peu souvent dans la pratique, on a :

$$C = \frac{m\, n^2}{8}\, M^2 r\, \frac{k_1}{r^2 + k_1^2\, L^2}\, I^2 \quad \text{(page 132)}$$

Si on cherche la valeur de r, rendant le couple maximum pour un glissement donné k_1, on arrive à la relation :

$$r^2 = k_1^2\, L^2$$

Digitized by Google

Si donc on a :

$$r \geqslant k\,L$$

le couple sera maximum au démarrage (courbes 1 et 2 de la fig. 143). Si $r < kL$, on aura la courbe 3 de la même figure.

Dans les limites pratiques de fonctionnement du moteur (k' voisin de k), la puissance et le facteur de puissance augmenteront avec k_1, c'est-à-dire à mesure que k' diminue.

M. G. Roux a, dans l'*Industrie électrique* du 10 avril 1894, donné diverses courbes relatives à des moteurs biphasés.

La figure 144 représente en abscisses les couples par les efforts en

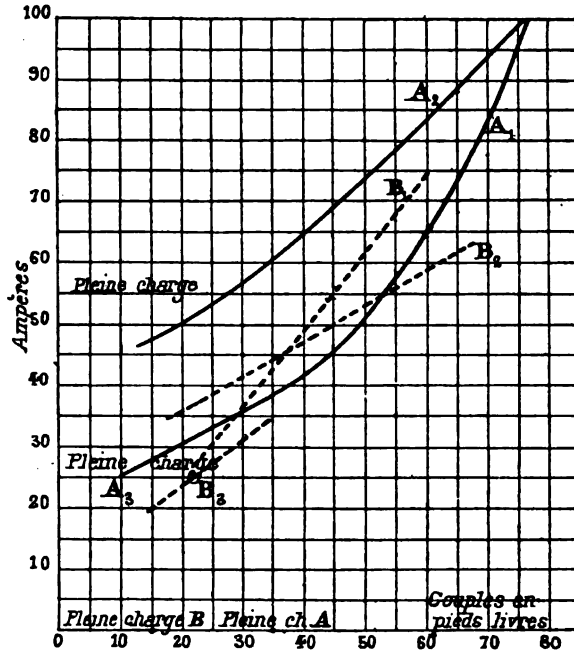


Fig. 144

livres exercés à l'extrémité d'un bras de levier de un pied et en ordonnées, les différentes intensités. Les courbes A se rapportent à un moteur de 10 chevaux et les courbes B à un moteur de 5 chevaux. A_1 montre l'effort produit par la variation de la résistance intercalée dans le circuit induit sur l'intensité et le couple, la différence de potentiel étant maintenue constante; A_2 correspond à la variation du couple en fonction de l'intensité du courant pour une différence de potentiel variable, la résistance étant fixe et ajustée pour donner un

Digitized by Google

couple très puissant; enfin A_3 est analogue à A_2, mais la résistance a été augmentée pour obtenir un couple plus faible. Le couple correspondant à la pleine charge est de :

35 livres × 33 cm.

B_1, B_2, B_3 sont des courbes semblables relatives à un moteur de 5 chevaux dont le couple à pleine charge est de 17,5 livres. En examinant les courbes, on remarque que les moteurs établis dans les conditions A_3 et B_3 ne requièrent pour exercer au démarrage un couple égal à celui à pleine charge, qu'un courant beaucoup plus faible qu'à pleine charge, et que pour un courant de même valeur, le couple de démarrage est double de celui à pleine charge.

La figure 145 montre la variation du facteur de puissance (cos θ, voir page 143) en fonction de la charge pour deux types de moteurs triphasés. La courbe A se rapporte à un moteur de 15 chevaux à

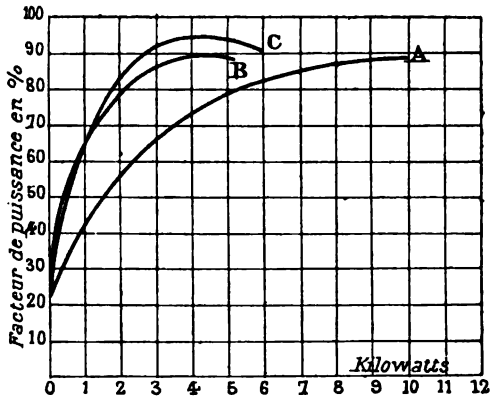


Fig. 145

4 pôles, fonctionnant avec une fréquence de 50 périodes par seconde. La courbe C met en évidence, le haut facteur de puissance, que l'on peut obtenir dans un moteur bien étudié. A pleine charge, ce facteur atteint 90 % pour A et 94 pour C. A demi-charge, ce facteur encore très élevé atteint 84 % dans le moteur de 10 chevaux et 75 % dans les moteurs de 5 chevaux. L'importance du facteur de puissance peut être plus facilement saisie en considérant l'intensité requise en fonction de la puissance. Dans la figure 147, la courbe A se rapporte à

Digitized by Google

un moteur de 5 chevaux, la courbe B à un de 10, la courbe C à un moteur de 15 chevaux.

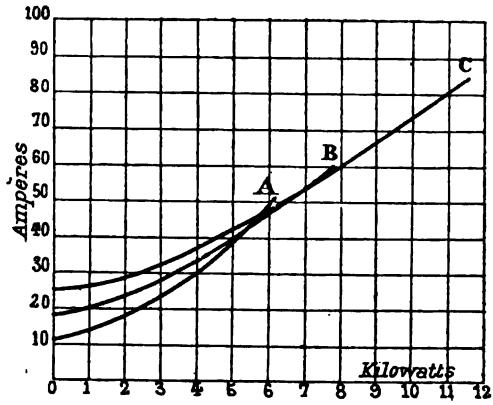


Fig. 146

Les inducteurs sont enroulés, comme nous l'avons vu, de manière à produire un champ tournant bi ou multiphasé.

Comme à marche normale, la vitesse du moteur est à peu près celle du synchronisme ($N_1 = N - \eta N$, η variant de 0,02 à 0,05), les moteurs de grandes dimensions doivent être multipolaires, le nombre de tours par minute étant donné par la relation:

$$N_1 = N - \eta N = \frac{60\,F}{p}(1 - \eta)$$

F étant la fréquence du courant, et p le nombre de paires de pôles. (Voir la table, page 95), en y faisant $C = p$, on aura N).

L'induit constitué par un tambour ou un anneau en tôle feuilletée, est enroulé en tambour ou en anneau, mais toujours de manière à obtenir des circuits fermés (dans lesquels on peut au besoin intercaler les rhéostats de démarrage) produisant chacun autant de pôles qu'il y en a dans l'inducteur.

Un autre système très souvent employé est dû à M. Dobrowolsky; l'induit est constitué par des barreaux équidistants, placés à la périphérie de l'anneau dans les tôles, aussi près que possible de l'entrefer (voir fig. 147). Ces barreaux sont reliés à leurs deux extrémités par des bagues en cuivre. On a aussi une armature en *cage d'écureuil*, de résistance très faible (r, résistance d'un cadre, est égal au

Digitized by Google

double de la résistance d'un barreau), mais alors on ne peut y disposer do rhéostat pour le démarrage.

Dans les très petits moteurs, l'induit peut être formé tout simplement d'un cylindre de fer ou de cuivre. On a alors de grandes pertes par courants de Foucault, et les courants induits ne sont pas canalisés de manière à être dirigés dans le sens où leur action est maximum. Le rendement de tels moteurs est donc très faible, mais par contre la construction en est facile et le prix de revient peu élevé.

L'inducteur peut être fixe et l'induit mobile ou vice versa.

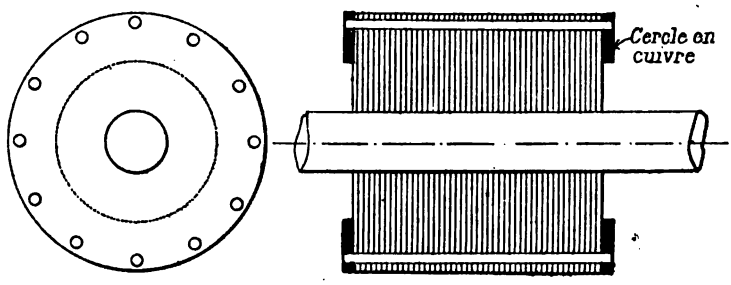


Fig. 147

Quand l'induit est mobile et que ses spires sont fermées complètement sur elles-mêmes, le moteur ne comporte aucun balais; le rhéostat de démarrage doit alors être intercalé dans les circuits fixes de l'inducteur. Si l'on veut intercaler au démarrage des résistances dans l'induit, on le munit de bagues, reliant les extrémités des divers circuits au rhéostat de démarrage. Quand le moteur a atteint sa vitesse de synchronisme, on met ces balais en court circuit.

Quand l'inducteur est mobile, les courants sont amenés par des balais frottant sur des bagues, il est alors facile d'intercaler les rhéostats de démarrage dans les circuits induits fixes.

La disposition d'inducteur intérieur peut être employée avec avantage dans les grands moteurs, car le volume de l'inducteur est alors réduit au minimum, et les pertes par hystérésis sont diminuées.

En effet, les renversements du courant dans l'inducteur $\left(F = \frac{k}{2\pi}\right)$ sont plus fréquents que dans l'induit $\left(F_1 = \frac{k_1}{2\pi} = \frac{k - k'}{2\pi}\right)$, de sorte que la perte par hystérésis par unité de volume est plus élevée dans l'inducteur que dans l'induit (1er volume, page 270).

Digitized by Google

Dans les moteurs d'assez grande puissance (au-dessus de 3 à 5 chevaux, à moins qu'ils ne soient de construction spéciale on emploie des rhéostats de démarrage.

Dans les petits moteurs, à induit tournant, qui ne possèdent ni bagues, ni balais, on ne se sert pas de rhéostats de démarrage, on donne à l'induit une résistance assez forte pour empêcher les courants d'atteindre dans l'inducteur, une intensité dangereuse.

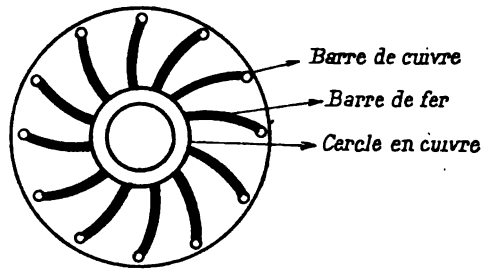


Fig. 148

Une excellente disposition est, dans ce cas, de constituer l'armature de la manière suivante (fig. 148) : Les barreaux en cuivre sont placés à la périphérie, noyés dans les tôles de l'induit à la manière ordinaire, mais les cercles de liaison aux deux extrémités ont un diamètre très faible, et sont reliés aux barreaux, par des conducteurs en fer doux, aussi longs que possible, ayant une section assez forte et, par conséquent, une faible résistance aux courants continus, mais dont la résistance augmente avec la fréquence (voir 1er volume, page 36) à cause de la s. i. Au démarrage la fréquence étant très élevée, ces conducteurs offrent une grande résistance, tandis qu'à pleine charge la fréquence étant faible la résistance diminue.

Nous allons donner quelques renseignements sur les divers moteurs à champ tournant les plus employés, en les classant par ordre alphabétique.

Moteurs Brown.— La Société des établissements Wehyer et Richemond, qui exploite en France les brevets Brown, construit plus spécialement des moteurs biphasés (fig. 149 et 150). L'inducteur fixe comporte un enroulement en tambour, l'induit peut être constitué par une cage d'écureuil, ou comporter pour les moteurs (ordinaire-

Digitized by Google

ment à 6 pôles) un enroulement triphasé aboutissant à trois bagues qui communiquent par trois balais à un rhéostat triphasé.

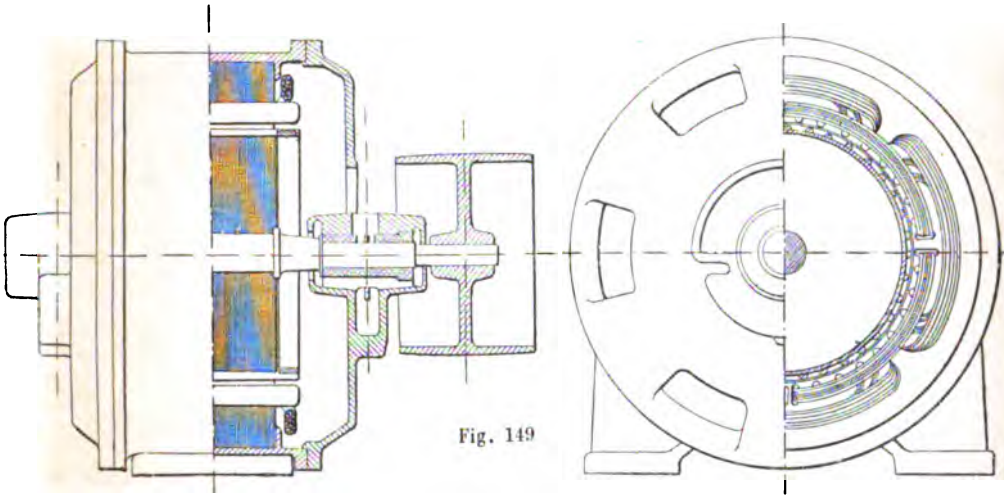


Fig. 149

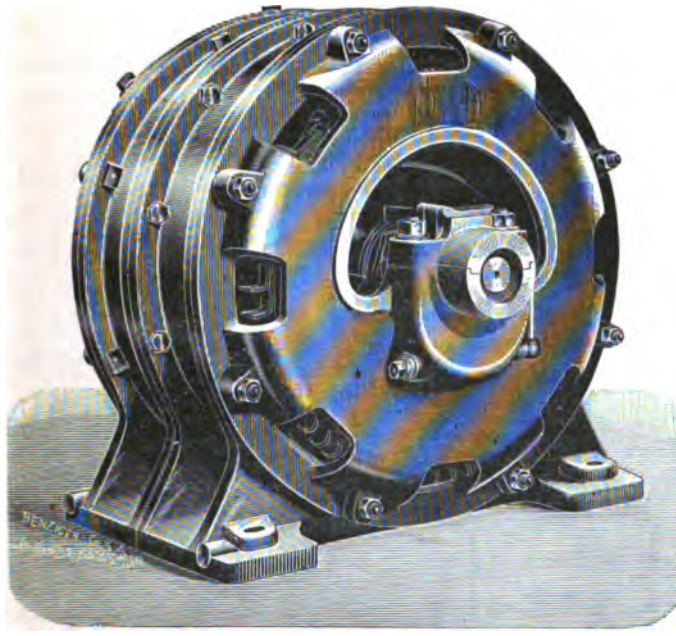


Fig. 150

Dans les moteurs à cage d'écureuil, M. Boucherot, ingénieur des établissements Wehyer et Richemond, emploie le dispositif suivant pour le démarrage (fig. 151) :

Digitized by Google

Sur chacun des circuits est placée en dérivation une bobine de s. i. baignant dans l'huile, si la f. e. m. est élevée. Lors de l'enroulement de ces bobines à la fabrication, on réserve plusieurs prises de courant, en soudant au fil quelques œillets, *a*, *b*, *c*, *d*, qui permettent d'intercaler plus ou moins de spires au démarrage suivant les couples exigés par les appareils à mettre en mouvement. Lors des essais, on fait choix de l'œillet correspondant à un démarrage suffisamment rapide sans que le courant de ligne atteigne une trop grande intensité. On peut ainsi arriver à ce que le courant de ligne au démarrage soit inférieur au courant à pleine charge ou le surpasse de très peu.

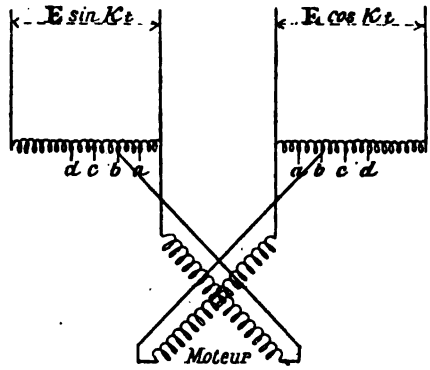


Fig. 151

Lorsque le moteur a atteint sa vitesse normale, on supprime au moyen d'un commutateur la bobine de s. i. et le moteur est placé directement sur le réseau.

Dans la bobine de s. i., il se passe à la fois des phénomènes de s. i. et d'induction mutuelle, de sorte que l'intensité du courant circulant dans les inducteurs peut être notablement supérieure à celle du courant de ligne.

Plus on met de couches de la bobine en dérivation, plus le couple au démarrage est puissant, mais aussi plus le courant de ligne est intense.

La figure 152 donne les courbes du rendement, du décalage de l'intensité efficace dans les circuits des inducteurs d'un moteur à champ tournant biphasé à six pôles de 15 à 20 chevaux. La fréquence étant de 40, la vitesse de synchronisme est :

$$N = \frac{60 \times 40}{3} = 800 \text{ tours à la minute.}$$

La figure 153 donne les courbes de rendement de la variation de vitesse, de la puissance totale et de la puissance utile en fonction

Digitized by Google

de la traction en kilogrammes à la périphérie d'une poulie de 12 cm. de diamètre, d'un moteur biphasé de un cheval et demi, avec champ à 4 pôles, dont la vitesse de synchronisme est :

$$N = \frac{60 \times 40}{2} = 1.200 \text{ tours à la minute.}$$

M. Boucherot emploie, pour mesurer l'intensité efficace du courant de chaque phase de l'inducteur, le décalage et le rendement, les méthodes suivantes qui sont très ingénieuses (1) :

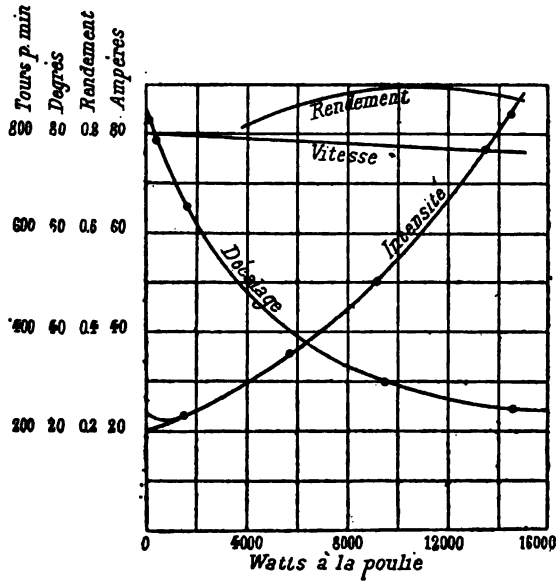


Fig. 152

L'intensité dans chaque phase peut être lue à l'ampèremètre, mais par suite des oscillations très grandes de l'appareil, M. Boucherot préfère la méthode indiquée ci-après qui permet de déterminer en même temps les décalages,

Le gros fil d'un wattmètre est relié à un commutateur à deux directions, ce qui permet de faire passer dans ce fil, le courant d'une phase ou de l'autre ; le fil fin est également relié à un commutateur à deux directions, permettant de le mettre en dérivation aux bornes

1. *Transport de force chez MM. Ménier, à Noisiel*, par Paul Boucherot. *La Lumière électrique*, nos 20 et 21, tome LII.

Digitized by Google

de l'une ou de l'autre phase. De sorte que pour une charge donnée, on peut faire quatre lectures. Si E_0', I_1 et θ_1 sont, la f. e. m. efficace, l'intensité efficace, et l'angle de décalage pour une phase, E_0'', I_2 et θ_2 les quantités correspondantes pour l'autre phase et c la constante du wattmètre, on a :

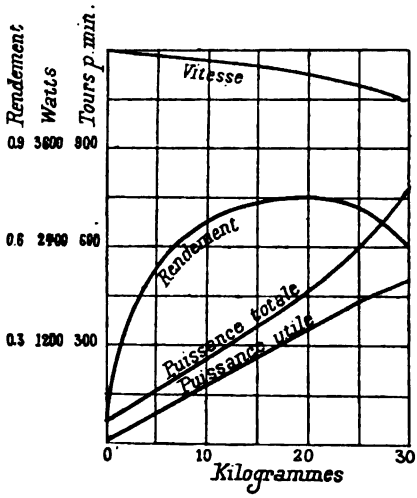


Fig. 153

$$\delta_1 = c\, E'_0\, I_1 \cos\theta_1$$

$$\delta_2 = c\, E_0''\, I_2 \cos\theta_2$$

$$\delta_3 = c\, E_0'\, I_2 \cos\left(\theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) = c\, E_0'\, I_2 \sin\theta_2$$

$$\delta_4 = c\, E_0''\, I_1 \cos\left(\theta_1 - \frac{\pi}{2}\right) = c\, E_0''\, I_1 \sin\theta_1.$$

On tire facilement de ces quatre équations, connaissant E_0' et E_0'' (qui sont toujours égaux, ainsi que I_1 et I_2 et θ_1 et θ_2) les valeurs de l'intensité efficace et du décalage dans chaque phase.

Les pertes dans le moteur se composent : 1° des pertes ohmiques dans l'inducteur, faciles à déterminer, en mesurant la résistance à chaud et connaissant l'intensité efficace pour une charge donnée ; 2° des pertes dues à la résistance de l'induit ; 3° des pertes par frottements par hystérésis et courants de Foucault.

La perte ohmique dans l'induit est impossible à déterminer directement dans un induit à cage d'écureuil.

Nous avons vu que si P_p est la perte dans l'induit, et P la puissance à la poulie (augmentée des pertes par frottement dans les coussinets), on a (page 132) :

$$\frac{P}{P + P_p} = \frac{k'}{k} = \frac{k - k_1}{k}$$

$$P_p = P\,\frac{k_1}{k - k_1}$$

On peut donc déterminer P_p en connaissant P, et en mesurant k et k_1. Pour cela deux personnes, également habiles, prennent plusieurs fois et ensemble, les vitesses du moteur et de l'alternateur qui les commande.

Digitized by Google

Quant à la perte par frottements, hystérésis et courants de Foucault, dans les inducteurs, pour la connaître, il suffit de remarquer que l'induction est presque constante, quelle que soit la charge, et que, pour chaque charge, cette induction est égale à celle donnant à vide la force contre-électromotrice E — RI.

Si, par exemple, le voltage de marche est 100, et les fils inducteurs absorbent 2 % pour une certaine charge, les pertes par frottements hystérésis et courants de Foucault, à cette charge, seront égales à la puissance prise par le moteur tournant à vide avec 100 — 2 = 98 volts aux bornes. En réalité, cette puissance est un peu plus grande que la perte, puisque l'induit tourne alors un peu plus vite qu'en charge. On mesure cette puissance au wattmètre.

Le rendement mesuré, ainsi qu'il vient d'être décrit, est plutôt légèrement inférieur à la réalité, pour les raisons données ci-dessus, et en outre, parce que le wattmètre employé, pour mesurer la puissance à vide, ayant toujours un peu de s. i. peut indiquer plus de watts qu'il n'y en a en réalité (1er volume, page 55).

En mesurant le rendement par le rapport du travail absorbé au frein, au travail fourni, pour un moteur de 1 ½ cheval (fig.153) et par la méthode des pertes séparées, M. Boucherot a obtenu les résultats suivants :

CHARGE en chevaux	RENDEMENT	
	Par la méthode des pertes séparées	au frein
0,5	0,52	0,55
1,0	0,67	0,67
2,0	0,76	0,76
3,0	0,75	0,63

On voit donc que, sauf pour les surcharges considérables du moteur (au double de sa puissance normale), la méthode par pertes séparées donne plutôt des rendements moindres.

Moteurs biphasés du Creusot. — L'inducteur fixe (1) (fig. 154) est

1. L'*Industrie électrique* du 10 juin 1894.

Digitized by Google

analogue à celui d'un alternateur Ganz : les bobines dans chaque phase, placées en série, sont enroulées alternativement dans un sens

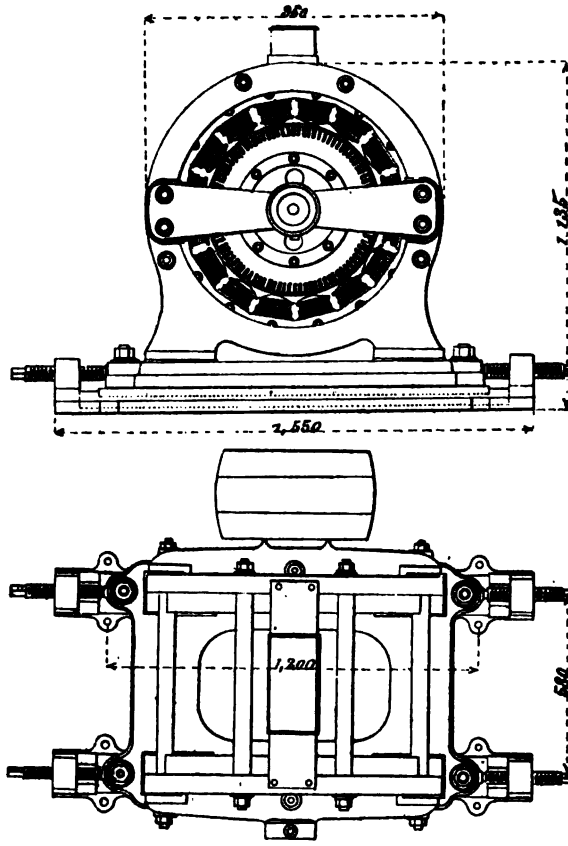


Fig. 154

et dans l'autre, et les bobines des deux phases sont alternées. Si $4n$ est le nombre total des bobines, et F la fréquence, le nombre de tours par minute N, à la vitesse du synchronisme, est donné par la relation :

$$N = \frac{60\ F}{n}$$

L'armature est constituée par un anneau en tôle feuilletée, portant des rainures à sa périphérie. L'enroulement est constitué de manière à former des bobines plates, en forme de spirale (voir *Alternateur Labour*, page 46), les spires les plus éloignées embrassant entre elles

Digitized by Google

deux intervalles de pôle. Dans un premier bobinage, les 2 n bobines (pour 4 n pôles), toutes placées en série, sont alternativement enroulées dans un sens et dans l'autre; par-dessus est disposé un second bobinage, identique au premier, mais chevauchant sur lui à demi-intervalle de pôle. Il y a donc en tout $4n$ bobines, formant deux séries.

Deux des extrémités des fils des deux séries de bobines sont reliées ensemble, et le fil commun aboutit à une bague munie d'un frotteur. Il en est de même des extrémités libres des deux bobinages qui, par l'intermédiaire des frotteurs, sont reliées à deux rhéostats à liquide, ayant chacun une borne reliée au fil commun.

Chacun des rhéostats à liquide, servant au démarrage, est constitué par une cuve à sulfate de cuivre, dans laquelle plongent verticalement deux plaques métalliques que l'on peut, au moyen d'un volant, éloigner l'une de l'autre, ou rapprocher jusqu'au contact.

Sur le fil commun aux deux séries de bobines, est installé un petit rhéostat métallique servant à faire varier la vitesse en marche. (Voir page 143).

Les moteurs de 30 chevaux, employés aux mines de Decize, pour actionner des ventilateurs ont 16 pôles; comme la fréquence est de 42, le nombre de tours au synchronisme est :

$$N = \frac{60 \times 42}{4} = 630$$

L'excitation de chaque pôle est au régime normal de 1.350 ampères-tours, et l'induction correspondante dans les noyaux de 4.500 unités C. G. S.

L'entrefer a 2 m. m.; le diamètre extérieur du cylindre de l'induit est de 554 m. m., sa longueur suivant l'axe de 300 m. m. Les rainures ont une largeur de 9 m. m. et une profondeur de 30 m.m. La résistance de chacune des séries de bobines, fermées sur elles-mêmes, est de 0,05 ohm.

Les essais de ces moteurs ont donné les résultats suivants ;

Rendement à demi-charge, 80 %; à pleine charge, 88. % A vide, ou avec une faible charge, le démarrage se produit presque dès le début de la manœuvre des rhéostats. Avec un couple résistant, correspondant à la puissance maximum (30 et même 33 chevaux) à la vitesse de régime, le moteur demarre quand les plaques des rhéostats arrivent à quelques centimètres les unes des autres. A vide, la vitesse de ré-

Digitized by Google

gime diffère de moins de 1 % de celle du synchronisme ; elle est inférieure du 2,5 % à demi-charge, et de 5 à 6 % à pleine charge.

A pleine charge, au bout de cinq à six heures de marche, la température ne dépasse que d'environ 40° la température ambiante.

Moteurs de la Compagnie de Fives-Lille,

La Compagnie de Fives-Lille exploite en France les brevets de « l'Allgemeine Elektricitæts Gesellschaft », dont l'ingénieur en chef est M. Dobrowolsky.

Les petits moteurs sont à induit mobile, avec enroulement en cage d'écureuil, l'inducteur étant muni d'un enroulement Gramme.

Dans les grands moteurs, l'induit est fixe et enroulé en tambour, ainsi que l'inducteur mobile.

Les petits moteurs, jusqu'à 3 chevaux, ne sont pas munis de dispositif pour le démarrage ; au-dessus de 3 chevaux, on emploie un rhéostat pour le démarrage.

La Compagnie de Fives-Lille construit également des grands moteurs spéciaux pour lesquels il n'est pas nécessaire d'employer un dispositif spécial pour le démarrage, mais nous n'avons pu nous procurer aucun renseignement sur ces moteurs.

Voici, d'après l'*Électricien*, n° 126 de 1893, quelques renseignements sur les électromoteurs triphasés Debrowolsky. La fréquence est de 50, la différence de potentiel efficace aux bornes de 60 volts. Il n'y a pas de dispositif spécial pour le démarrage ; l'induit est en cage d'écureuil.

Puissance normale en chevaux . .	1/8	1/2	1	5	50
Nombre de tours par minute à pleine charge.	2300	1400	1375	1395	725
Nombre de pôles	2	4	4	4	8
Glissement à pleine charge $\frac{k_1}{k}$.	0,29	0,067	0,08	0,07	0,033
Poids en kilogrammes.	18	60	94	245	1200
Intensité du courant dans chaque phase : au démarrage. . . .	»	»	20	50	400
Intensité du courant dans chaque phase : en marche normale.	1,4	4	8	36	280
Intensité du courant dans chaque phase : à vide.	»	»	4,5	15	150
Puissance absorbée en marche normale. Kilowatts.	0,23	0,50	0,99	4,4	40,2
Rendement industriel à pleine charge	»	0,71	0,75	0,84	0,91
Couple au démarrage en kilogrammètres.	»	»	0,52	2,6	49,4

Digitized by Google

L'échauffement en service continu atteint 40 à 50° pour les moteurs de 50 chevaux. M. Kolben, ingénieur de le Société Oerlikon, a procédé à des essais sur un moteur triphasé de « l'Allgemeine Elektricitæts Gesellschaft », de 60 chevaux, à huit pôles, armature en cage d'écureuil, à la fréquence de 50 : les résultats de ces essais sont indiqués ci-dessous.

Chevaux à la poulie	Watts à la poulie	Courant en ampères dans chaque phase	Volts entre chaque circuit et le point neutre	Watts vrais fournis au moteur	Facteur de puissance	Glissement en % à pleine charge	Rendement
60	44.160	318	60	48.300	0,844	2 %	0,91
42	30.910	252	60	36.800	0,810	1,3	0,84
20	14.720	150	60	17.700	0,655	»	0,83
»	»	125	60	»	»	»	»

Moteurs Lahmeyer.

L'induit est fixe, constitué par un anneau en tôles minces isolées, muni d'un enroulement en cage d'écureuil.

L'inducteur mobile est enroulé en tambour, les spires étant placées dans des rainures.

Les courants sont amenés au moyen de trois bagues, sur chacune desquelles frottent deux balais.

La figure 155 donne le schéma de montage d'un moteur à Bockenheim, fonctionnant sous une différence de potentiel de 660 volts.

Les trois fils de ligne aboutissent à un petit tableau de distribution (l'un traversant un ampéremètre A) passent par un commutateur et des plombs fusibles, puis par un rhéostat triple à liquide R, un compteur C et aboutissent aux bornes du moteur.

A Bockenheim, également, la maison Lahmeyer a installé des transformateurs rotatifs de 30 k.w., transformant les courants triphasés en courant continu destiné à l'éclairage.

Ce transformateur est un moteur asynchrone dont l'inducteur tournant est muni d'un second enroulement aboutissant à un collecteur pour courant continu, placé à l'opposé des bagues amenant les courants triphasés. Comme le montre la figure 156, les enroulements

Digitized by Google

sont placés dans des rainures très profondes disposées à la périphérie de l'anneau en tôle feuilletée, constituant l'inducteur.

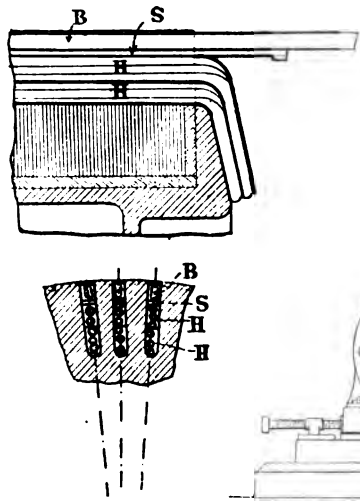


Fig. 156

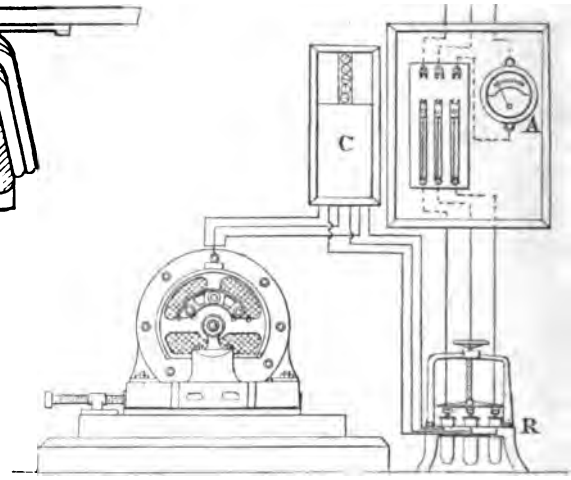


Fig. 155

A la partie inférieure des rainures sont disposés les enroulements inducteurs H recevant le courant triphasé, à la partie supérieure est disposé l'enroulement B, donnant le courant continu à 110 volts. Afin d'éviter que par suite d'un défaut d'isolement, le circuit à basse tension (continu) puisse communiquer avec les circuits à haute tension (triphasés), on a placé entre les deux enroulements un séparateur composé de lames de cuivre S, isolées des deux côtés et reliées au bâti.

Le rendement atteint 90 % à pleine charge, car le frottement et les pertes par hystérésis sont beaucoup moindres que dans le cas de deux machines accouplées. Le générateur à courant continu fonctionne sans étincelles et il n'y a pas besoin de déplacer les balais quand la charge varie.

Moteurs des établissements d'Oerlikon (fig. 157).

Les moteurs sont constitués par un inducteur fixe, annulaire en tôle feuilletée, enroulé en anneau pour les types de faible puissance et en tambour pour ceux d'une puissance plus élevée. L'armature est enroulée, soit en cage d'écureuil, soit en tambour.

Digitized by Google

Les établissements d'Oerlikon, emploient de préférence le système triphasé et construisent des moteurs pour haut voltage.

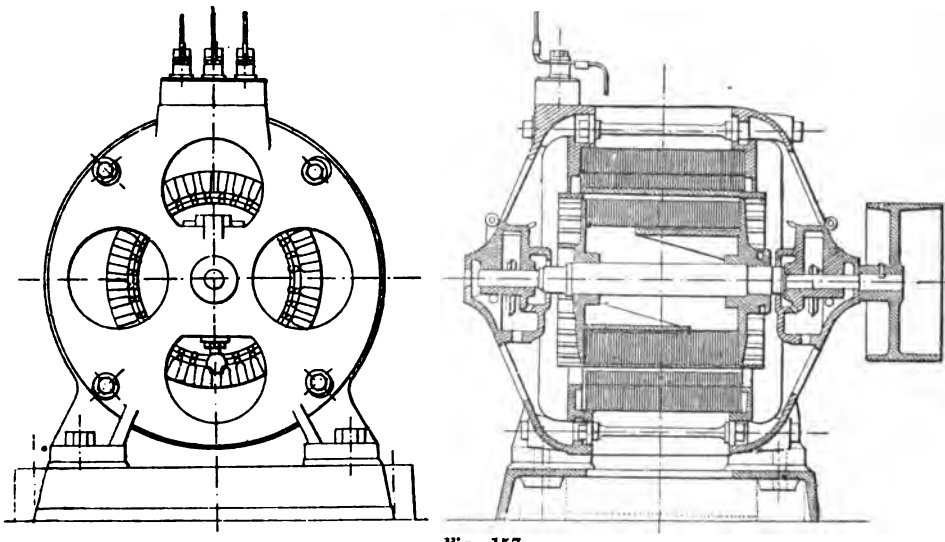


Fig. 157

La figure 158 donne les courbes du rendement et du facteur de puissance, pour un moteur de 100 chevaux, à champ tournant à 18 pôles, fonctionnant avec un courant à 50 périodes sous une différence de potentiel efficace de 1.700 volts.

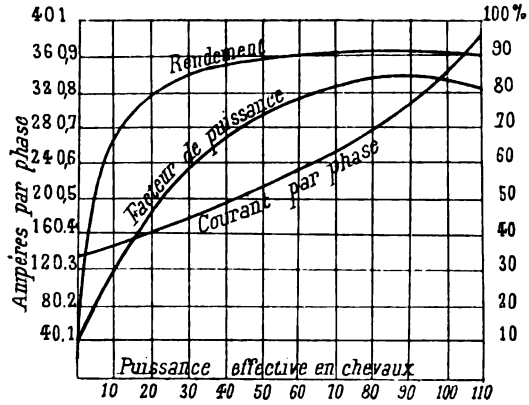


Fig. 158

L'enroulement à haute tension est constitué par des fils, isolés au moyen de tubes de mica, placés dans des rainures où ils sont main-

Digitized by Google

tenus par des coins en matière isolante. L'armature est enroulée en tambour avec 18 pôles et cet enroulement est divisé en trois portions principales. La vitesse au synchronisme est de $\frac{60 \times 50}{9} = 333$ tours et la vitesse à pleine charge de 320 tours, le glissement est donc de 4 % environ.

Le tableau suivant donne les résultats des essais d'un moteur de 50 chevaux, à la tension de 100 volts environ, à champ tournant à 8 pôles par phase (vitesse au synchronisme $N = \frac{50 \times 60}{4} = 750$) l'armature comprend 11 divisions formées sur elles-mêmes.

Chevaux à la poulie	Watts à la poulie	Courant en ampères dans chaque phase	Voltage entre chaque circuit et le point neutre	Watts apparents A	Watts vrais V	Facteur de puissance $\frac{V}{\overline{V}}$	Glissement en %	Rendement
53,8	39.600	180	98	50.220	42.100	0,84	4 %	0,94
46	53.900	158	95	45 000	37.440	0,83	3 %	0,905
»	»	40	98	11.760	1.710	0,145	»	»

M. Kolben (1), Ingénieur des établissements d'Oerlikon a procédé à des expériences très intéressantes, pour déterminer la dispersion des lignes de force dans un moteur triphasé, c'est-à-dire le nombre de lignes de force ne traversant pas l'induit; il a déterminé le *facteur de dispersion*, c'est-à-dire le rapport du flux traversant l'induit au flux créé dans les inducteurs.

Le moteur à champ tournant à 6 pôles qui a servi aux essais a une puissance normale de 9 chevaux. L'enroulement de l'inducteur comportait 36 bobines de 7 tours chacune, et l'enroulement de l'armature 90 barres, aménagées dans des trous constituant un enroulement à tambour à 6 pôles, cet enroulement étant disposé de manière à fermer trois circuits indépendants. Pour déterminer la dispersion, le moteur étant immobile, l'enroulement de l'armature était remplacé par un enroulement d'essai, passant seulement dans 30 des 90 trous de l'armature, avec deux fils dans chaque trou, toutes les spires étant en série, et un voltmètre était intercalé entre les extrémités.

1. Kapp, *Electric transmission of energy*.

Digitized by Google

Il y avait donc pour chaque phase de l'inducteur $7 \times 12 = 84$ tours de fil et dans l'armature 60 tours. Au moyen de voltmères, M. Kolben, mesurait la f. e. m. dans les inducteurs et dans l'armature.

La f. e. m. induite dans l'armature, variait très peu quand on faisait varier (à la main) sa position, la moyenne de la f. e. m. était de 60,5. La f. e. m. dans les bobines de l'armature était de 98 volts.

Si le flux avait été le même, dans les deux bobines, les voltages auraient été proportionnels aux tours et si x, représente le voltage dans l'armature, on aurait eu :

$$\frac{84}{60} = \frac{98}{x} \qquad x = \frac{98 \times 60}{84} = 70 \text{ volts}$$

Au lieu de 70 volts, M. Kolben a obtenu 60,5 volts, le facteur de dispersion était donc :

$$F_d = \frac{60,5}{70} = 0,865$$

Il y a donc 135 lignes de force perdues par dispersion, pour 1.000 lignes de force engendrées dans l'armature. Ceci s'applique aux conditions de l'expérience, c'est-à-dire quand aucun courant appréciable ne passe dans l'armature, et pourrait également s'appliquer au cas où l'armature tournerait sans charge, car alors le courant d'armature a une intensité très faible.

Par contre, quand le moteur tourne en charge, les ampères-tours du champ et de l'armature sont beaucoup plus élevés, le fer approche plus de la saturation, la résistance augmente et naturellement la dispersion s'accroît.

Pour trouver le facteur de dispersion dans ce cas, M. Kolben a fait fonctionner le moteur muni de son armature ordinaire, en plaçant une bobine d'essai de 8 tours, sur un des pôles du champ, aussi près que possible de l'armature. Il observait la f. e. m. dans cette bobine, le moteur tournant à vide ou chargé. La chûte de f. e. m. quand le moteur fonctionnait en charge était une indication de la baisse du facteur de dispersion.

Le tableau suivant donne un résumé des essais :

Digitized by Google

OBSERVATIONS	Nombre de tours par minute	Fréquence du courant	F. e. m. aux bornes	Intensité du courant par phase	F. e. m. induit dans la bobine d'essai		Watts absorbés	Facteur de dispersion
					Armature	Placée sur un pôle		
Au repos. . . .	0	50	98	20,2	60,5		365	0,865
Marche à vide . .	980	49	98	22,3		26,0	500	0,865
Surchargé à 12,5 chevaux. .	930	49	98	45,7		24,5	10260	0,815

Le facteur de dispersion, pour la surcharge du moteur a été déterminé en multipliant le facteur de dispersion à vide (0,865) par le rapport des voltages de la bobine d'essai $\left(\frac{24,5}{26,0}\right)$.

Le rendement de ce moteur surchargé à 12,5 chevaux, était 90 %, et le facteur de puissance :

$$\frac{10260}{3 \times 98 \times 45,7} = 0,775$$

Moteurs Siemens et Halske.

La maison Siemens et Halske, a construit des moteurs triphasés du type décrit ci-dessous (1).

Il se compose d'un anneau en tôle feuilletée (fig. 159) sur lequel sont enroulées trois bobines recevant les trois courants décalés de $\frac{2\pi}{3}$. A l'intérieur de cet anneau est disposé un anneau Gramme muni d'un collecteur ordinaire, sur lequel frottent trois balais reliés aux trois bobines de l'anneau fixe. On voit qu'en somme l'anneau intérieur est monté en triangle, et qu'il s'y développe un champ tournant qui fait un tour par période, les courants arrivant à cet anneau en des points fixes dans l'espace.

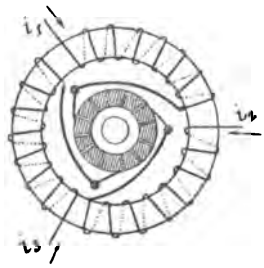


Fig. 159

Dans l'anneau fixe il y a un champ tournant faisant également un tour par période.

1. *Les Courants polyphasés*, par J. Rodet et Busquet.

Digitized by Google

En calant les balais de façon que les pôles des deux anneaux se confondent, l'anneau ne tournera pas. En les calant de manière à ce que les deux champs ne soient pas dirigés suivant le même rayon l'anneau mobile tournera de manière à rapprocher un de ses pôles du pôle de nom contraire de l'anneau mobile, mais il est facile de voir que le jeu du collecteur assignera à ces deux pôles une distance dépendant du calage des balais. La vitesse du moteur augmente entre certaines limites avec l'angle de calage des balais, qui sont portés par un même balancier.

Les moteurs *biphasés de la Stanley électric C° de Pitsfield* (1) (S. K. C) sont en somme des moteurs asynchrones à double champ alternatif.

Ces moteurs sont destinés à fonctionner sur un réseau secondaire à 500 volts, à la fréquence de 133 (voir page 86). Comme les décalages et par conséquent l'impédance, sont considérables à cette fréquence, on a dû les réduire en plaçant un condensateur en dérivation sur chacun des circuits. Les condensateurs de la Stanley électric Cie (voir chapitre III) supportent parfaitement une tension de 500 volts.

L'inducteur, en forme d'anneau est constitué à peu près comme l'induit de l'alternateur de la même Compagnie (page 86). Cet anneau porte à l'intérieur deux couronnes de pièces polaires (la figure 160

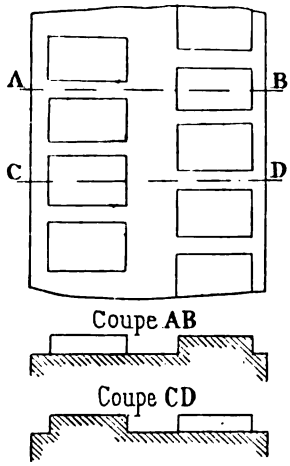


Fig. 160

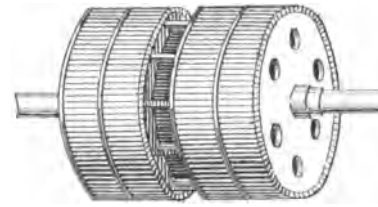


Fig. 161

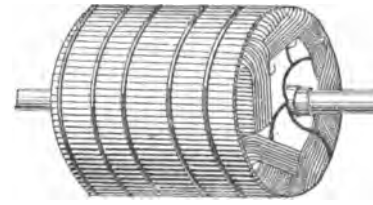


Fig. 162

donne le développement de la partie interne de l'anneau inducteur).

1. *L'Industrie électrique* du 10 septembre 1894.

Digitized by Google

L'axe de la pièce polaire de l'une des deux couronnes correspond à la rainure séparant deux pièces polaires de l'autre couronne.

Chacune des couronnes, qui comporte un nombre pair de pièces polaires est excitée par une des deux phases, de sorte que les deux flux agissent sur l'induit comme un champ tournant. L'induit est constitué par deux couronnes de tôle feuilletée (Fig. 161 et 162), séparées par un vide, correspondant chacune à une des couronnes de pièces polaires.

A la surface des deux couronnes de l'induit, sont entaillées des dents qui se correspondent. Dans les creux de ces dents sont disposés les fils de l'armature, qui sont ensuite frettés. L'enroulement constitue deux circuits fermé sur eux-mêmes dans les petits moteurs (jusqu'à 1500 volts) et à travers des rhéostats dans les moteurs de plus grande puissance. Si chacune des couronnes de l'induit comporte 2M pôles, il y a 2Mn rainures sur l'induit, ou alors à la surface de l'induit 2M groupes de n fils placés consécutivement et appartenant alternativement à l'une ou à l'autre des deux séries qui comportent donc chacune Mn spires en tension.

Afin d'éviter les perturbations dans le réseau, au moment du démarrage, on met en marche les petits moteurs en tirant sur la courroie et en leur donnant ainsi une certaine vitesse avant de fermer le commutateur. Les moteurs d'une puissance supérieure à 1.500 watts sont mis en marche au moyen de rhéostats de démarrage. Les deux circuits de l'induit qui ont une extrémité commune, communiquent par l'intermédiaire de 3 bagues à un rhéostat double.

Le rendement des moteurs de 750 watts est de 70 %, celui des moteurs de 3.500 watts de 80 % et celui des moteurs d'une puissance supérieure à 10 k. w. atteint 90 %. Le glissement à pleine charge est assez élevé, il atteint 10 % dans les moteurs de faible puissance et 6 % dans les gros moteurs.

MOTEURS ASYNCHRONES A CHAMP ALTERNATIF SIMPLE.

Le couple moteur est exprimé par la relation (page 138).

$$C = \frac{m\,r\,S^2\,B_o^2}{8}\left\{\frac{k-k'}{r^2+(k-k')^2\,L^2}-\frac{k+k'}{r^2+(k+k')^2\,L^2}\right\}$$

m étant le nombre de spires de l'induit.

Digitized by Google

S, r et l étantrespectivement, la surface, la résistance et le coefficient de s. i. d'une spire.

k la vitesse angulaire du courant ou 2π F.

F étant la fréquence, k' la vitesse angulaire de l'induit, B_0 l'intensité maximum du champ.

$$L = \frac{m\,l}{2}$$

Si ces valeurs sont exprimées en unités C. G. S, le couple est donné en dynescentimètres.

La puissance en ergs par seconde sera :

$$P = k' C$$

Le couple est donc nul au démarrage et aussi pour une valeur d'autant plus voisine du synchronisme que $\frac{r}{L}$ est plus petit.

Le couple est nul pour une valeur de k' donnée par la relation :

$$k^2 L^2 - k'^2 L^2 - r^2 = 0.$$

La courbe de la figure 163 représente la valeur du couple en fonction de k'.

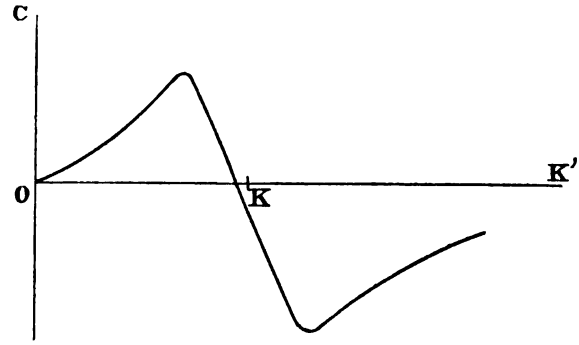


Fig. 163

On voit donc qu'il faut faire fonctionner le moteur dans le voisinage du synchronisme, car alors une surcharge (qui occasionne un ralentissement augmente le couple et le moteur ne cale pas). Du reste comme nous l'avons vu page 139, le rendement augmente avec k', comme pour les moteurs asynchrones à champ tournant.

Le moteur ne peut démarrer seul, il faut le lancer de manière à ce qu'il atteigne une vitesse k', plus élevée que celle qui donne le couple

Digitized by Google

maximum (voir figure 163) si alors le couple est inférieur au couple maximum la vitesse du moteur s'accélère jusqu'à ce que la vitesse de régime soit atteinte.

Le coefficient de glissement c'est-à-dire, le rapport $\frac{k-k'}{k}$ est plus élevé que dans les moteurs à champ tournant, il varie de 4 à 12 %.

Comme l'expression du couple est symétrique au signe près, en k et k', on voit que le moteur lancé dans une direction, continuera à tourner dans cette direction, ce qui est confirmé par la pratique.

Le premier moteur asynchrone a été exposé par M. Elihu Thomson à l'Exposition universelle de 1889, voici la discription qu'en donne M. Potier, Ingénieur en chef des mines dans la *Revue technique de l'Exposition universelle* (*Electricité industrielle*).

« Six bobines fixes à noyau plat formé de feuilles de tôle, forment les faces d'un prisme héxagonal dont les arêtes sont parallèles à l'axe et reçoivent le courant de la génératrice. L'arbre porte un système de six bobines semblables, mobiles à l'intérieur des primaires; les deux extrémités du fil enroulé sur ces bobines sont reliées, l'une aux touches paires, l'autre aux touches impaires d'un commutateur à six touches centré sur l'arbre; une paire de balais porte sur ce commutateur; l'un des balais est relié à la sortie des bobines fixes, l'autre à la génératrice, de sorte que lorsqu'ils frottent sur le commutateur, le courant parcourt le circuit des bobines fixes, puis celui des bobines mobiles; le sens des connexions est ainsi renversé six fois par tour dans le circuit mobile. Si on donne à la main à la machine une première impulsion elle continuera à tourner quand le courant alternatif sera lancé dans le circuit et son mouvement s'accélère. »

« Lorsque la vitesse normale (1.500 tours) est atteinte, on tourne les balais jusqu'à leur faire toucher deux contacts réunis par un court circuit; le courant continue alors par l'action réciproque du courant et du magnétisme induit dans les bobines mobiles mises en court-circuit ».

« Une disposition spéciale assure la fermeture de l'induit dès que la vitesse atteint 1.500 tours; des segments métalliques demi-circulaires, portés par l'arbre, à l'intérieur du commutateur et retenus par des ressorts s'appliquent sur ses touches par l'action de la force centrifuge et ferment le circuit quand la vitesse est suffisante. »

Digitized by Google

« La machine ainsi lancée, les balais peuvent être enlevés. Cette machine n'est point synchrone et continue à tourner avec une vitesse moindre quand on la charge, mais le démarrage ne peut se faire de lui-même et est accompagné de nombreuses étincelles. »

En 1891, MM. Hutin et Leblanc construisirent des moteurs asynchrones à courant alternatif simple et en donnèrent la théorie (voir la *Lumière électrique* du 30 mai 1891).

M. Brown et la Société d'Oerlikon, se lancèrent vers cette époque dans la construction des moteurs asynchrones à champ alternatif simple et ne tardèrent pas à rendre ce genre de moteurs tout à fait pratique.

En pratique, le moteur est constitué par un anneau inducteur en tôle feuilletée muni, soit d'un enroulement Gramme, soit d'un enroulement en tambour, il peut être multipolaire et la vitesse est alors réduite comme dans le cas des moteurs polyphasés.

L'induit, ordinairement intérieur, peut être muni, soit d'un enroulement en cage d'écureuil, soit d'un enroulement en tambour et peut comporter un certain nombre de subdivisions fermées sur elles-mêmes, donnant naissance chacune à autant de pôles qu'en a l'inducteur, comme dans le cas des moteurs asynchrones à champ tournant (page 146).

Naturellement afin de diminuer l'entrefer, les fils à la partie interne de l'inducteur et les fils de l'induit, à la partie externe sont noyés dans les tôles feuilletées (voir page 8).

Les figures 164 et 165 représentent un moteur bipolaire, muni d'un

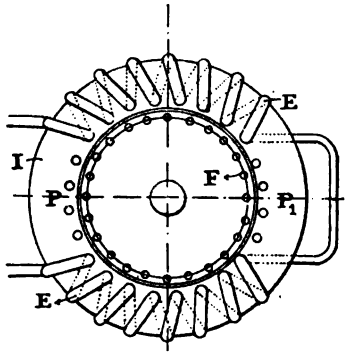


Fig. 164

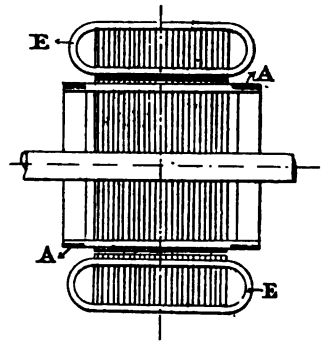


Fig. 165

enroulement Gramme (qui est naturellement placé sur toute la surface de l'anneau), l'induit est en cage d'écureuil.

Digitized by Google

Les figures 166 et 167, représentent un induit enroulé en tambour, les deux extrémités opposées de l'enroulement sont reliées par des bagues à un circuit extérieur, dans lequel on peut intercaler des résistances, afin de pouvoir faire varier la vitesse.

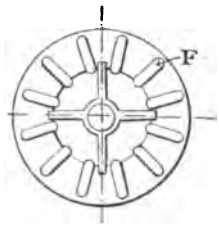


Fig. 166.

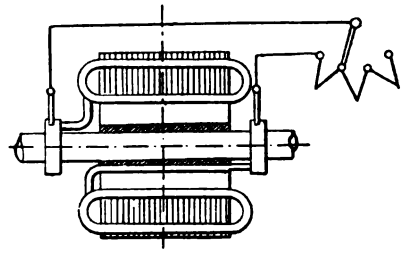


Fig. 167.

Comme nous l'avons vu, ces moteurs ne peuvent démarrer seuls, mais il suffit de les lancer, pour qu'ils se mettent en marche et atteignent bientôt la vitesse correspondant au couple résistant.

Les petits moteurs peuvent être munis d'une poulie folle, et peuvent être lancés à la main, de manière à ce qu'ils atteignent une vitesse suffisante pour que le couple moteur puisse vaincre les résistances passives, on met ensuite le moteur en charge, en faisant passer la courroie de la poulie folle sur la poulie fixée sur l'arbre.

Dans les grands moteurs, on ne peut employer ce système, les résistances passives étant trop fortes.

M. Brown (1) a indiqué diverses méthodes que l'on peut employer pour obtenir le démarrage.

On peut munir le moteur d'un enroulement complémentaire placé, par exemple, dans les intervalles du premier, au moment du démarrage le courant envoyé dans cet enroulement est décalé par rapport au courant circulant dans le premier enroulement, de sorte qu'il en résulte un champ tournant faisant démarrer le moteur. Celui-ci se met a tourner et atteint bientôt sa vitesse normale voisine du synchronisme et l'on peut alors interrompre le courant dans l'enroulement complémentaire, qui peut être formé de conducteurs de sections très réduites.

Le décalage de phase entre les courants circulant dans les deux enroulements peut être obtenu de diverses manières.

1. L'*Elektrotechnische Zeitschrift* du 17 février 1893.

Digitized by Google

On peut, comme l'indique la figure 168, placer dans le circuit de l'enroulement complémentaire une bobine de s. i., ou comme l'indique

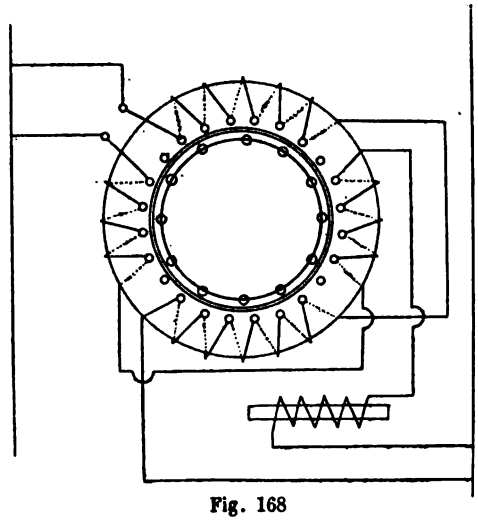


Fig. 168

la figure 169, une capacité. M. Brown se sert, à cet effet, de condensateurs à liquides du système Stanley et Molly (voir chapitre III).

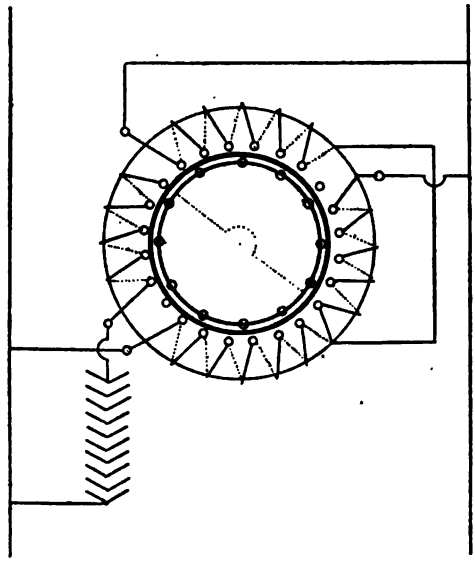


Fig. 169

Comme l'indique la figure 170, un des enroulements peut être disposé en anneau et l'autre en tambour, comme la s. i. est beaucoup plus

Digitized by Google

considérable dans le premier enroulement et que la résistance est plus faible, on voit que l'on obtient le décalage voulu.

Par ces méthodes on peut obtenir, au démarrage, un couple très puissant, M. Brown a pu obtenir pour un moteur de 1 1/2 cheval, un couple correspondant à une puissance de 3 chevaux en marche normale.

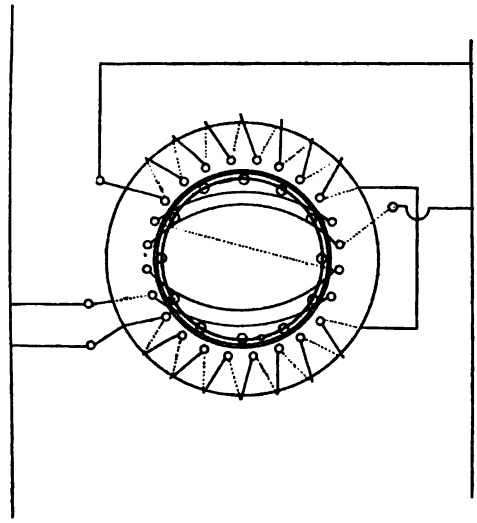


Fig. 170

Une autre méthode pour la mise en marche, consiste à munir l'armature d'un enroulement mis en communication avec un collecteur.

Suivant la position des balais, les spires de l'induit peuvent être mises en communication avec le courant ou être placées en court-circuit. Quand les balais sont placés dans la position voulue, on a un couple très énergique et le moteur démarre. Dès que le moteur a atteint sa vitesse normale, le collecteur peut être mis en court-circuit, soit au moyen d'un anneau que l'on glisse sur lui, soit en reliant, au moyen de deux balais, en communication l'un avec l'autre, deux anneaux reliés à deux points diamétralement opposés de l'enroulement. C'est ce dispositif qui a été employé par M. Elihu Thomson, dans le moteur que nous avons décrit plus haut.

Dans ce cas, l'enroulement de l'inducteur est simple, c'est-à-dire que l'on n'a pas besoin de le munir d'un enroulement complémentaire. Par contre, l'induit doit être muni d'un collecteur et doit être

Digitized by Google

enroulé en tambour ou en anneau, ou comme les machines Brush ou Thomson-Houston.

M. le Dr Behn-Eschenburg (1), Ingénieur des ateliers d'Oerlikon, a étudié un moteur qui peut démarrer seul, tout en n'absorbant pas alors un courant d'intensité trop forte et dont on peut faire varier la vitesse et le couple moteur dans des limites aussi grandes que pour un moteur à courant continu.

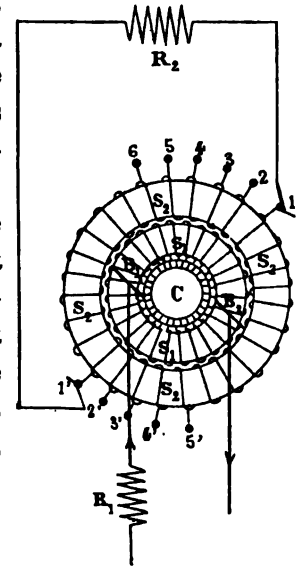


Fig. 171

L'induit extérieur (fig. 171) est constitué par un anneau muni d'un enroulement Gramme continu portant une sorte de collecteur. L'inducteur intérieur est également un anneau muni d'un enroulement Gramme avec collecteur. La partie des spires voisines de l'entrefer est naturellement noyée dans les tôles.

Le courant est amené à l'induit par l'intermédiaire de deux balais B_1 B_2, qui appuient sur le collecteur. Un rhéostat R_1 permet de faire varier l'intensité efficace de ce courant.

Si l'induit était simplement muni de l'enroulement continu, aucun courant n'y circulerait, car les f. e. m. y sont constamment opposées.

Le collecteur dont cet anneau est muni, permet de relier entre eux deux points diamétralement opposés de l'enroulement, 1—1', 2—2', etc., par un circuit dans lequel est intercalé un rhéostat R_2. Il circule alors des courants dans les deux moitiés de l'anneau et dans le circuit qui les relie, de sorte qu'un couple est engendré et l'inducteur se met à tourner.

On déplace les balais B_1 B_2, de manière à obtenir le moins d'étincelles possible, et en fait, on arrive à n'en avoir pas plus qu'avec une bonne dynamo à courant continu.

On pourrait également avoir l'induit intérieur et l'inducteur extérieur, mais M. Behn-Eschenburg a constaté que dans ce cas, les étincelles sont plus à craindre.

1. D'après un article de M. Behn-Eschenburg, paru dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* du 26 mai 1893.

Digitized by Google

Quand la ligne de contact des balais B_1 et B_2 de l'inducteur, fait avec la ligne des contacts 1—1' des balais de l'induit un angle compris entre 0 et 90°, il y a un couple moteur dont la valeur dépend de l'intensité des courants, inducteur et induit (réglables au moyen des rhéostats) et de l'angle que nous venons de définir. Ce couple peut être suffisant pour que le moteur démarre en charge.

Dans certaines circonstances, le couple croît avec la vitesse et l'on peut alors placer les balais de manière à ce que les deux lignes de contact coïncident.

La régulation du moteur peut se faire complètement sans emploi de rhéostats et sans déplacement des balais de l'inducteur, rien qu'en faisant varier les points de contact des balais de l'induit. Il n'y a pas de limite de vitesse, M. Behn Eschenburg a pu actionner un tel moteur d'une puissance de 6 chevaux, avec un courant d'une intensité peu supérieure à celle du courant de magnétisation, la vitesse pouvant varier de 0 au double de celle de la marche synchrone.

Le rendement de ce moteur est au moins aussi élevé que celui d'un moteur asynchrone ordinaire.

Si I_1 et I_2 représentent les intensités efficaces dans l'inducteur et dans l'induit, α l'angle entre les deux lignes de contact, N_1 le nombre de tour du moteur, N le nombre de tours dans le cas du synchronisme ($N = 60\ F$), ρ la résistance apparente du système induit, r sa résistance ohmique et l, son coefficient de s. i. M le coefficient d'induction mutuelle des deux systèmes, R la résistance ohmique du système inducteur et L son coefficient de s. i,, le couple est donné par la relation.

$$C = \frac{M^2 I_1^2}{R^2} r \left\{ 2\pi\ N_1 \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} (2\pi N)^2 l \sin 2\alpha \right\}$$

avec :

$$I_1^2 = \frac{E^2}{\left(R + \frac{M^2 u^2}{\rho^2} r\right)^2 + \left(p L - \frac{M^2 u^2}{\rho^2} p_1 l\right)^2}$$

en posant :

$$u^2 = p^2 \sin^2 \alpha + p_1^2 \cos^2 \alpha$$
$$p = 2\pi N$$
$$p_1 = 2\pi N_1$$

La relation montre bien l'influence des variations de α, r et R ainsi que l'influence de la vitesse du moteur.

Digitized by Google

MM. *Hutin et Leblanc*, emploient pour obtenir le démarrage d'un moteur asynchrone monophasé, le dispositif suivant :

Entre l'induit mobile et l'inducteur est adapté un anneau en tôle feuilletée muni d'un enroulement en cage d'écureuil. Cet anneau est monté fou sur l'arbre.

Pour le démarrage, on donne à la main une impulsion à cet anneau qui se met à tourner sous l'influence du champ tournant dans le même sens que lui (voir page 137) et ne tarde pas à atteindre la vitesse du synchronisme. Le second champ tournant produit par le champ alternatif est fixe par rapport à l'anneau, il agit sur l'induit, qui démarre seul, comme celui d'un moteur polyphasé et se met à tourner en sens inverse de l'anneau.

On voit en somme que l'anneau joue le rôle d'un écran.

M. Boucherot, ingénieur des établissements Wehyer et Richemond a procédé à des essais de rendement, sur des moteurs asynchrones monophasés. Il employait à cet effet, des moteurs biphasés Brown, en ne se servant que de l'enroulement de l'une des phases, celui de

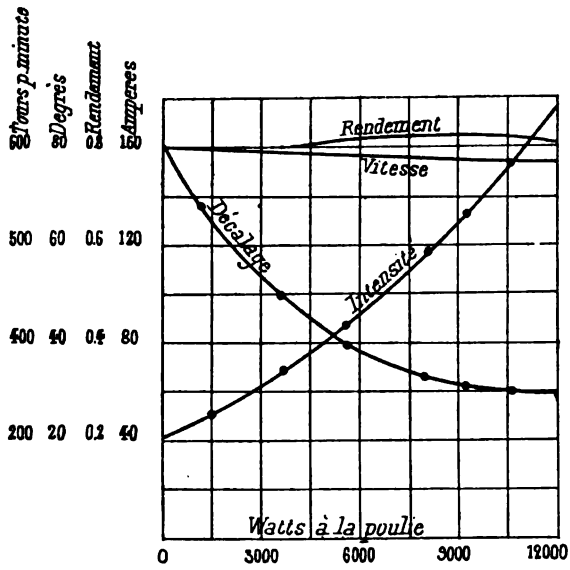


Fig. 172

l'autre phase servant au démarrage (le courant y était décalé, au moyen d'un condensateur à liquide).

Les courbes de la figure 172 donnent les résultats des essais pour

Digitized by Google

un moteur de 520 kilogrammes, de 12 à 15 chevaux de puissance, quand on emploie une seule phase, et de 17 à 20 chevaux à deux phases.

Les rendements ont été obtenus par la méthode des pertes séparées (page 151) mais les rendements ainsi obtenus sont de 2 à 3 % trop élevés, ce qui résulte du tableau suivant, qui s'applique à un petit moteur :

CHARGE du moteur	RENDEMENT	
	Mesuré par les pertes séparées	Par le rapport des watts à la poulie aux watts fournis, etc.
1/2 cheval.	0,56	0,56
1 cheval.	0,685	0,65
1 1/2 cheval. . . .	0,715	0,68
2 chevaux.	0,685	0,50

La différence provient de ce que le rendement de l'induit n'est pas exactement proportionnel à $\frac{k'}{k}$ (voir page 139).

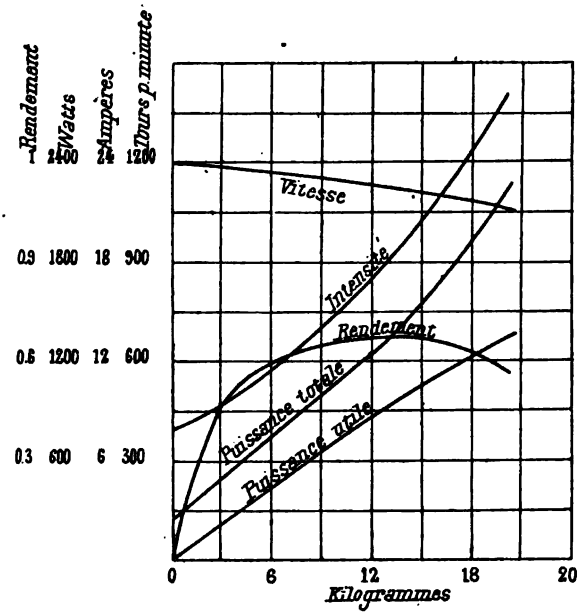


Fig. 173

Les courbes de la figure 173 se rapportent à un petit moteur de

Digitized by Google

120 kg. donnant de 1,5 à 2 chevaux avec une phase et de 2,4 à 3 chevaux avec deux phases (les courbes de la figure 153 se rapportent au fonctionnement de ce moteur avec deux phases) les abscisses sont proportionnelles à l'effort en kg. sur une poulie de 12 cm. de diamètre.

Le tableau suivant donne les résultats des essais faits par M. Riccardo Arno, sur un moteur de 15 chevaux, sans bagues de contact et sans dispositif pour réduire l'intensité du courant au démarrage. Le moteur a 6 pôles, la fréquence normale est de 40, de sorte que la vitesse au synchronisme est de $\frac{2400}{3} = 800$, pendant les expériences la fréquence était de plus de 40, et la tension aux bornes de 150 volts environ.

L'essai a eu lieu en chargeant le moteur au moyen d'un frein.

NOMBRE de tours par minute	Watts à la poulie	Watts vrais	Volts	Ampères	Watts apparents	Facteur de puissance en %	Rendement en %
0	0	17.595	132	150	19.800	89	0
876	0	688	157	27	4.252	16	0
862	574	1.173	156	27	4.303	27	49
863	1.943	2.652	155	31	4.774	56	73
866	2.870	3.774	157	36	5.630	67	76
868	4.136	5.176	156	42	6.520	79	80
863	5.085	6.171	154	47	7.307	84	82
862	5.652	6.732	154	51	7.792	86	84
859	6.940	7.854	152	57	8.694	90	88
858	7.728	8.823	151	64	9.634	92	88
856	9.980	11.398	149	82	12.218	93	88
851	11.385	13.923	146	102	14 943	93	82
812	11.886	15.478	143	118	16.903	92	77
816	12.320	16.626	144	128	18.432	90	74

M. Kolben (1) a procédé à des essais pour déterminer le facteur de dispersion; il a employé le même moteur que pour l'essai avec des courants triphasés (page 160); les 36 bobines de l'inducteur étaient mises en tension.

1. Kapp, *Electric transmission of energy.*

Digitized by Google

La fréquence était de 50; la f. e. m. appliquée de 180 volts; l'intensité du courant de 18,8 ampères; les watts absorbés 432. La f. e. m. induite dans la bobine d'expérience de l'armature de 60 tours était de 54 volts dans certaines positions; dans d'autres positions, elle était plus faible, et descendait à 0. En traçant la courbe de cette f. e. m., il obtenait une sinusoïde, et la f. e. m. effective était donc :

$$\frac{54}{\frac{\pi}{2}} = 34{,}4$$

Le facteur de dispersion est alors :

$$\frac{252}{60} \times \frac{34{,}40}{180} = 0{,}800$$

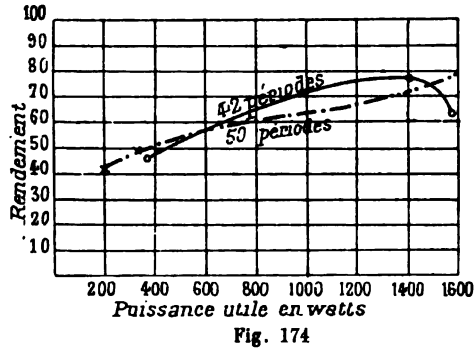


Fig. 174

Pour 1.000 lignes de force dans l'inducteur, il en passe 800 dans l'armature. Quand le moteur fonctionne en charge, le facteur de dispersion est plus petit que dans le cas de l'emploi des trois phases.

Le tableau suivant donne les résultats des essais faits par M. Kolben, sur un moteur d'Oerlikon de 3 chevaux, à la fréquence de 50. (Comparer avec le tableau de la page 162).

Chevaux à la poulie	Watts à la poulie	Intensité du courant de l'inducteur	Voltage aux bornes	Watts apparents	Watts vrais	Facteur de puissance	Glissement %	Rendement %
3,6	2650	45	110	4950	3776	76	4,5	70,5
0	0	21,8	112	2440	410	16,8	0	0

Les deux courbes de la figure 174 donnent les résultats d'essais faits sur un moteur d'Oerlikon de 2 chevaux, calculé pour 42 périodes.

Digitized by Google

§ 8. — CALCUL DES MOTEURS

Le calcul des moteurs synchrones est tout à fait analogue à celui des alternateurs (voir page 94). Il y a cependant lieu de remarquer que le décalage du courant en arrière de la f. e. m. a pour effet de renforcer le champ inducteur au lieu de le diminuer.

Le calcul direct des moteurs asynchrones est impossible, car il faudrait pouvoir déterminer à l'avance les coefficients de s. i. et d'induction mutuelle ; nous emploierons la méthode indirecte donnée par M. Kolben, ingénieur des établissements d'Oerlikon, dans « l'Elektrotechnische Zeitschrift » des 6 et 13 octobre 1893, qui conduit à des résultats pratiques tout à fait satisfaisants. Cette méthode est indiquée ci-après.

L'inducteur est enroulé, soit en anneau Gramme, soit en tambour et l'induit est muni, soit d'un enroulement en cage d'écureuil, soit d'enroulements en tambour, fermés sur eux-mêmes, et donnant chacun naissance à autant de pôles qu'il y en a dans l'inducteur.

On doit déterminer : les dimensions du fer de l'inducteur et de l'induit, le nombre des spires et les sections des fils des enroulements, et finalement le rendement du moteur; les données étant :

La fréquence F.

Le nombre de phases m (m étant égal à 1, pour un moteur monophasé).

La f. e. m. efficace E aux bornes, en volts.

La puissance utile en watts W.

Le nombre approximatif de tours N_a.

Le facteur de glissement $\frac{1}{g}$ (variant de 1,5 à 6 % pour un moteur polyphasé et de 4 à 10 %, pour un moteur monophasé).

Détermination du nombre de pôles et du diamètre de la partie mobile.

Soient, figure 175 (qui représente le schéma d'un moteur monophasé à quatre pôles ou d'un moteur biphasé bipolaire), D le diamètre extérieur de l'induit, x la largeur commune de l'inducteur et de l'induit, y l'épaisseur radiale de l'anneau inducteur, en dehors de la partie perforée pour le passage des fils.

Digitized by Google

On doit d'abord déterminer le nombre de pôles du moteur d'après la vitesse maximum admissible, on a :

$$N_a = \frac{60\,F}{p} \qquad p = \frac{60\,F}{N_a} \tag{1}$$

N_a, étant le nombre approximatif de tours, lorsque le synchronisme est atteint, F la fréquence du courant, et $2p$ le nombre de pôles du moteur.

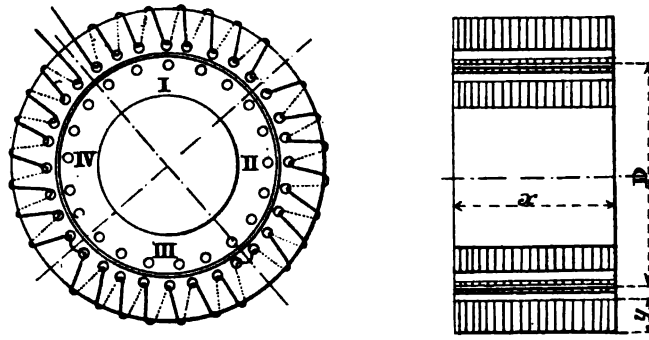


Fig. 175

La table de la page 95 pourra être utile pour cette détermination, en y remplaçant C par p. On prendra naturellement pour p, le nombre entier se rapprochant le plus de la valeur trouvée et on en déduira le nombre définitif N_t, de tours au synchronisme.

Si $\frac{1}{g}$ est le coefficient de glissement admis, le nombre de tours du moteur à pleine charge sera :

$$N = N_t - \frac{N_t}{g} = N_t\left(1 - \frac{1}{g}\right)$$

Si, par exemple, on admet un glissement de 4 %, on aura :

$$\frac{1}{g} = \frac{4}{100} = \frac{1}{25}$$

et le nombre de tours à pleine charge sera :

$$N = \frac{24}{25} N_t$$

Digitized by Google

On déterminera le diamètre extérieur D de la partie mobile, par la condition que la vitesse périphérique V_1 n'atteigne pas une limite dangereuse (pour un anneau en tôle feuilletée, V_1 doit être compris entre 1.500 et 2.500 c. m.), on aura donc au synchronisme :

$$D = \frac{60\ V_1}{\pi\ N_1}$$

On déterminera ensuite le diamètre extérieur D_1 de la partie fixe, en laissant un jeu aussi petit que possible. Comme ordinairement les fils de l'inducteur et de l'induit sont noyés dans les tôles, ce jeu peut être réduit à 2 ou 3 mm., même dans les grands moteurs.

On tracera ensuite le schéma du moteur et on déterminera le nombre b de bobines par phase (on aura ordinairement $b = 2\ p$, voir § 1, même chapitre).

Le nombre total des bobines inductrices étant mb, la longueur l d'une bobine, mesurée suivant l'entrefer, sera :

$$l\ m\ b = \pi\ D_1 \qquad l = \frac{\pi\ D_1}{m\ b}$$

dans le cas où l'induit est mobile. Dans le cas où l'inducteur est mobile, on aura :

$$l = \frac{\pi\ D}{m\ b}$$

Détermination de la section du fil de l'inducteur.

Pour déterminer I, l'intensité efficace par phase à pleine charge, d'une manière exacte, il faudrait connaître le décalage, mais on peut avoir une approximation suffisante en procédant de la manière suivante ; il suffira de prendre I d'un certain pour cent plus grand que I_1, intensité efficace de courant donné par la relation :

$$I_1 = \frac{W}{\eta\ m\ E}$$

dans laquelle W est la puissance du moteur en watts, η le rendement, et E la f. e. m. efficace en volts.

η peut atteindre 0,95 à 0,90 pour un moteur polyphasé de grande puissance, et 0,80 a 0,65 pour un moteur de faible puissance; dans le

Digitized by Google

cas d'un moteur monophasé, η varie de 0,90 à 0,60, suivant la puissance.

On a $I_1 = \eta' I$, η' étant le facteur de puissance à pleine charge qui peut atteindre la valeur 0,95 pour un moteur monophasé et 0,90 pour un moteur polyphasé.

La densité du courant i_1 en ampères par mm². pourra être choisie entre 0,50 et 2,5. Plus i_1 est faible, meilleur est le rendement, mais aussi plus coûteux est le moteur.

La section du fil, en mm², sera donnée par la relation :

$$s = \frac{1}{i_1}$$

On choisira le diamètre définitif d_1 du fil ou la section s_1 du ruban de cuivre, de manière à se rapprocher le plus possible de la valeur trouvée au moyen de la relation donnée ci-dessus.

La résistance du fil, en ohms par c. m. de longueur, sera donnée par les relations ci-dessous, qui supposent du cuivre pur à la température de 60° :

$$\rho = \frac{0{,}00025}{d_1^2} = \frac{0{,}0002}{s_1}$$

d_1 étant exprimé en m. m. et s_1 en m. m².

Détermination de la section de l'anneau inducteur et du nombre de spires de son enroulement.

Par suite des pertes par hystérésis, on admettra comme induction maximum dans le fer B, suivant la fréquence du courant, les valeurs données page 96.

L'induction B_1 dans l'entrefer pourra varier de 2.000 à 4.000, suivant son épaisseur, plus l'épaisseur sera faible, plus l'induction pourra y être élevée.

Fig. 176

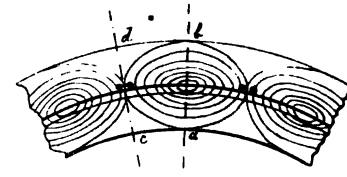


Fig. 177

La figure 176 indique les directions des lignes de force, dans le cas où l'inducteur est muni d'un enroulement Gramme ; la figure 177 se rapporte au cas d'un enroulement en tambour.

Digitized by Google

On voit, d'après ces figures, que l'on peut admettre que les lignes de force sont uniformément réparties dans l'entrefer.

En désignant par x (fig. 173) la largeur commune de l'induit et de l'inducteur, suivant l'axe, et par y l'épaisseur radiale de l'anneau inducteur, la section sera :

$$S = x\,y$$

et la section du fer :

$$S_1 = \delta\,x\,y$$

δ étant un coefficient tenant compte du papier isolant, on a ordinairement :

$$\delta = 0{,}85.$$

Le nombre total de lignes de force dans l'inducteur sera :

$$\Phi = \delta\,x\,y\,B$$

La surface d'une bobine, suivant l'entrefer, est lx, l étant la longueur de la bobine, le nombre total de lignes de force dans l'entrefer doit être :

$$\Phi_1 = B_1\,lx.$$

Comme il y a des lignes de force perdues par dispersion, il faudra en créer plus de Φ_1 dans la bobine. Si α est le facteur de dispersion, on aura :

$$\Phi = \frac{\Phi_1}{\alpha}$$

α étant pris égal à 0,75 environ (voir les expériences de M. Kolben, pages 162 et 176).

On aura donc :

$$\alpha\,\delta\,xy\,B = B_1\,l\,x \qquad y = \frac{1}{\alpha\,\delta}\,l\,\frac{B_1}{B}$$

et en remplaçant l par sa valeur (page 179) :

$$y = \frac{\pi\,D_1\,B_1}{\alpha\,\delta\,m\,b\,B}$$

En prenant $\alpha = 0{,}75$, $\delta = 0{,}85$, on aura :

$$y = 4{,}92\,\frac{D_1\,B_1}{m\,b\,B}$$

Digitized by Google

y, c'est-à-dire l'épaisseur radiale de l'anneau inducteur est donc ainsi déterminée.

Pour déterminer x, on peut chercher à rendre minima les pertes dans l'inducteur, qui sont les pertes par hystérésis et courants de Foucault et les pertes dans le cuivre.

L'induction maximum dans le fer est B (fig. 174 et 175). On calculera la perte w_i par hystérésis et courants de Foucault par c. m³. d'après les données (1er volume, chapitre VII) ou en s'aidant des tables (page 107).

La perte par hystérésis et courants de Foucault, sera approximativement pour une bobine :

$$p_i = \delta\, x y l\, w_i$$

La relation donnant le nombre de spires n d'une bobine est (1) :

$$\Phi_0 = \Phi = \frac{\sqrt{2}\,\mathrm{E}\,10^8}{2\,\pi\,\mathrm{F}\,n}$$

$$n = \frac{\sqrt{2}\,\mathrm{E}\,10^8}{2\,\pi\,\mathrm{F}\,\Phi}$$

mais on a d'autre part :

$$\Phi = \delta\, x y\, \mathrm{B}$$

$$n = \frac{\sqrt{2}\,\mathrm{E}\,10^8}{2\,\pi\,\mathrm{F}\,\delta\, y\,\mathrm{B}} \cdot \frac{1}{x} = \frac{\mathrm{A}}{x}$$

1. En effet, on peut considérer l'anneau inducteur comme un transformateur à circuit secondaire de résistance infinie. En faisant $r_2 = \infty$ dans la formule donnant E_a f. e. m. maximum à appliquer (1er volume page 96), on a :

$$\mathrm{E}^2_a = \frac{16\,\pi^2\,k^2\,n_1^4}{16\,\pi^2\,n_1^2}\,\Phi_0^2$$

$$\mathrm{E}_a = k\,n_1\,\Phi_0$$

$$\Phi_0 = \frac{\mathrm{E}_a}{k\,n_1}$$

Mais :

$$n_1 = n \text{ dans notre cas}$$

$$\mathrm{E}_a = \mathrm{E}\,\sqrt{2}$$

E étant la f. e. m. efficace appliquée :

$$k = 2\,\pi\,\mathrm{F}$$

$$\Phi_0 = \frac{\sqrt{2}\,\mathrm{E}}{2\,\pi\,\mathrm{F}\,n}$$

en unités C.G.S.. Si on exprime B en unités C. G. S. (Gauss) et E en volts, il faudra multiplier E par 10^8

Digitized by Google

A étant une constante, car y est connu.

Dans le cas d'une bobine à enroulement Gramme, la longueur d'une spire est approximativement :

$$2\,(x+y)$$

la longueur totale de l'enroulement sera donc :

$$2n\,(x+y) = \frac{2\,A\,(x+y)}{x} = A_1 + \frac{A_2}{x}$$

A_1 et A_2 étant deux constantes.

Dans le cas d'un enroulement en tambour, la longueur d'une spire est $2\,(x+l)$, de sorte que la longueur totale du fil pour une bobine, pourra encore être exprimée par une relation de la forme $A_1 + \frac{A_2}{x}$.

La résistance du fil étant ρ par c. m. de longueur (page 180) et l'intensité efficace du courant I (page 179), la perte par résistance sera en watts :

$$p_2 = \rho \left(A_1 + \frac{A_2}{x}\right) I^2$$

La perte totale de puissance dans une bobine sera donc :

$$p_1 + p_2 = \delta\, x\, y\, l\, w_1 + \rho \left(A_1 + \frac{A_2}{x}\right) I^2$$

c'est-à-dire de la forme :

$$A'\,x + A'' + \frac{A'''}{x}$$

La valeur de x, rendant la perte minimum sera donnée par la relation :

$$A' - A'''\,x^{-2} = 0$$
$$A'\,x^2 - A''' = 0$$

Ayant ainsi déterminé x, on calculera les valeurs de Φ_1 et de Φ, d'où l'on déduira la valeur de n, nombre de spires.

A la suite de l'examen d'un grand nombre de moteurs, M. Kolben a déterminé une constante qui permet de calculer directement le nombre de tours n de l'enroulement du champ. Cette constante C est le nombre d'ampères-tours par centimètre de développement de la circonférence sur laquelle sont placés les trous dans lesquels sont intro-

Digitized by Google

duites les barres inductrices, respectivement du diamètre de l'armature, qui en diffère peu.

$$C = \frac{m b \, l \, n}{\pi D_i} = \frac{I n}{l}$$

Pour 40 à 60 périodes, et une induction de 2.000 à 3.000 dans l'entrefer, la valeur de C, est comprise entre 100 et 150.

Cette relation n'est naturellement qu'une grossière approximation et doit dans chaque cas être employée judicieusement.

Le nombre de spires de l'enroulement d'une bobine est donc donné par la relation :

$$n I = C l$$

$$n = \frac{\pi D_i C}{I m b}$$

Ayant déterminé n, x sera donné par la relation :

$$x = \frac{A}{n}$$

On pourra déterminer x par la première méthode, en déduire n, puis vérifier si la valeur de C tombe bien entre les limites données par la méthode indiquée par M. Kolben. Parfois, particulièrement dans des moteurs ayant un grand nombre de bobines inductrices, pour n'avoir pas un enroulement trop compliqué, c'est-à-dire un trop grand nombre de spires, on est obligé d'augmenter x et de diminuer n, c'est-à-dire de sacrifier un peu du rendement.

On prendra pour n, le nombre entier immédiatement supérieur à celui trouvé et on pourra alors faire le tracé définitif de l'inducteur.

Il est facile de voir que les moteurs comportant un grand nombre de bobines inductrices auront un induit de section réduite, c'est-à-dire seront légers, mais que par contre, le nombre de spires inductrices sera considérable.

Calcul de l'induit.

Le moteur doit donner une puissance utile de W watts, avec un coefficient de glissement $\frac{1}{g}$, de sorte que le nombre de tours est :

$$N = \frac{60 F}{p}\left(1 - \frac{1}{g}\right) \text{(page 178)}$$

L'enroulement de l'armature est divisé en u portions fermées sur elles-mêmes, comprenant chacune v conducteurs en série.

Digitized by Google

Si r_1 est la résistance d'un conducteur (y compris les liaisons terminales), la résistance de l'une des u portions de l'enroulement sera :

$$R_1 = v r_1$$

La vitesse de l'enroulement par seconde est :

$$V_2 = \frac{\pi D_2 N \left(1 - \frac{1}{g}\right)}{60}$$

D_2 étant le diamètre moyen de l'enroulement.

Chaque conducteur a une longueur x et se déplace par rapport au champ d'intensité B_1 avec une vitesse $\frac{V_2}{g}$, la f. e. m. induite est donc en volts :

$$e_1 = \frac{x\, V_2\, B_1}{g\, 10^8}$$

et la f. e. m. induite dans les v conducteurs d'une des u portions de l'enroulement est :

$$E_1 = \frac{v\, x\, V_2 B_1}{g\, 10^8}$$

La perte totale de puissance dans le cuivre, sera :

$$\omega_1 = u \frac{E_1^2}{R_1}$$

Nous avons vu (pages 132 et 139), que le rendement, si on ne considère que la perte dans l'induit est proportionnel à $\frac{k'}{k}$,

on a donc :

$$\frac{W}{W + \omega_1} = \frac{k'}{k}$$

et comme :

$$k' = k\left(1 - \frac{1}{g}\right)$$

on aura :

$$\frac{\omega_1}{W} = \frac{k - k'}{k'} = \frac{k - k\left(1 - \frac{1}{g}\right)}{k\left(1 - \frac{1}{g}\right)} = \frac{\frac{k}{g}}{k - \frac{k}{g}} = \frac{1}{g - 1}$$

$$W = (g - 1)\, \omega_1 = \frac{E_1^2}{R_1}\, u\, (g - 1)$$

Digitized by Google

En remplaçant dans cette relation, E_1 par sa valeur, on aura donc :

$$W = \frac{v^2\, u\, x^2\, V_2^2\, B_1^2}{10^{16}\, R_1} \quad \frac{g-1}{g^2}$$

$v\,u$ est le nombre total n_1 de conducteurs placés à la périphérie de l'armature, on aura donc :

$$W = \frac{n_1^2\, x^2\, V_2^2\, B_1^2}{10^{16}\, u\, R_1} \quad \frac{g-1}{g^2}$$

On en déduit, pour la résistance R_1 d'une des u portions de l'enroulement :

$$R_1 = \frac{n_1^2\, x^2\, V_2^2\, B_1^2}{10^{16}\, u\, W} \quad \frac{g-1}{g^2}$$

L'intensité du courant circulant dans les conducteurs de l'armature sera :

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1} = \frac{v\, x\, V_2\, B_1}{10^8\, R_1\, g}$$

ou en remplaçant R_1 par sa valeur et en considérant que $v\,u = n_1$:

$$I_1 = \frac{10^8\, W}{n_1\, V_2\, x\, B_1} \quad \frac{g}{g-1}$$

On pourra donc calculer la section de l'enroulement et vérifier si la densité du courant par m. m.^{2} n'est pas trop forte.

Ces relations sont applicables à tous les induits et pour le cas d'une armature en cage d'écureuil, on a : $v = 1$, $u = n_1$ et R_1 est la résistance à donner à l'une des barres. Dans ces relations, V_2 est exprimé en c. m., W et ω_1 en watts, R_1 en ohms, E_1 en volts et B_1 en unités C. G. S.

Détermination du courant de magnétisation et du courant à pleine charge :

L'intensité efficace du courant, pour la marche à vide du moteur, peut être déterminée comme on le fait pour un transformateur (voir chapitre III).

Digitized by Google

Si l_1, a et l_2 (fig. 178) sont les longueurs moyennes des circuits magnétiques et B', B',, B'$_2$ les racines carrées des carrés moyens de l'induction (que l'on pourrait appeler les inductions efficaces) respectivement dans le fer de l'inducteur, dans l'entrefer et dans le fer de l'induit μ_1 et μ_2 les valeurs correspondantes de la perméabilité magnétique (à déterminer d'après les courbes de magnétisme), le nombre total d'ampères-tours du champ par phase, pour un moteur ayant b_1 bobines par phase, tournant à vide, sera :

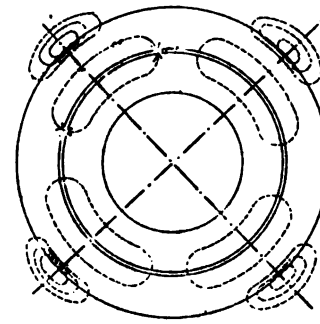


Fig. 178

$$I'n' = \frac{10}{4\pi} b \left(2 a B_1' + \frac{l_1}{\mu_1} + \frac{l_2}{\mu_2}\right)$$

et l'intensité efficace dans le cas de marche à vide, sera :

$$I' = \frac{0{,}80\, b \left(2 a_1 B_1' + \frac{l_1}{\mu_1} + \frac{l_2}{\mu_2}\right)}{n'}$$

Cette relation montre que l'intensité efficace du courant dans l'inducteur augmente avec le nombre des pôles c'est-à-dire avec b ; pour un même nombre de tour du moteur par minute, avec la fréquence ; car le facteur principal, qui est la résistance de l'air, reste la même pour une dimension donnée du moteur (elle est proportionnelle à l'épaisseur de l'entrefer, qui reste constante).

L'intensité efficace du courant, lors de la marche à vide, différera peu de celle du courant de magnétisation, car la puissance de w' watts que l'on doit fournir en plus au moteur, pour vaincre les résistances passives, les pertes dans le cuivre, etc..., est faible :

$$I_1' = \frac{\omega'}{E}$$

est l'intensité efficace du courant nécessaire pour vaincre les résistances

Digitized by Google

passives, etc. L'intensité efficace du courant, le moteur tournant à vide sera :

$$I_2' = \sqrt{I'^2 + I'^2_1}$$

et I'_2 sera très voisine de I'. Si le moteur, une fois construit, l'on s'aperçoit que I'_2 diffère beaucoup de I', c'est que le calcul est mauvais. Il y a alors dans l'armature des courants induits, de fausse direction, qui ne contribuent pas à augmenter la valeur du couple et sont une source de perte d'énergie. Dans ce cas, même, à vide, le glissement sera très grand. Les courants de cette nature ne peuvent être écartés dans les moteurs monophasés.

L'intensité efficace du courant à pleine charge, peut être déterminée de la manière suivante :

On peut sans grande erreur admettre que l'intensité efficace du courant de magnétisation à pleine charge est I' (quoique par suite de la diminution de l'induction dans le fer, il soit un peu plus faible).

L'intensité efficace du courant watté I'', est donnée en fonction de la puissance utile W du moteur et de la puissance perdue w_1 par la relation :

$$I'' = \frac{W + w_1}{E}$$

Le courant total, étant la résultante du courant de magnétisation et du courant watté, (qui sont décalés de $\frac{\pi}{4}$ l'un par rapport à l'autre), son intensité efficace sera donnée par la relation :

$$I = \sqrt{I'^2 + I''^2}$$

On peut alors vérifier la section du fil de l'armature et la perte de puissance, due à sa résistance,

Calcul du rendement.

Les diverses pertes peuvent être déterminées ainsi qu'il suit :

1° ***Pertes par hystérésis et courants de Foucault.***

Nous avons déterminé page 182, la perte par hystérésis et courants de Foucault par c. m³ de l'inducteur, la perte totale est donc facile à calculer. La perte par hystérésis et courants de Foucault dans l'in-

Digitized by Google

duit, sera déterminée en considérant que l'induction maximum est B_2, et la fréquence $\frac{F}{g}$.

2° La perte dans le cuivre du champ sera :

$$\omega = m I^2 R$$

I étant l'intensité efficace du courant à pleine charge par phase et R la résistance totale du fil de l'armature par phase.

3° La perte dans le cuivre de l'armature, est d'après l'équation de la page 185.

$$\omega_1 = u \frac{E_1^2}{R_1}$$

4° Les pertes par frottements et résistance de l'air seront évaluées, en watts par comparaison avec un moteur existant.

§ — 9. INFLUENCE DE LA FORME DE LA COURBE DE LA F. E. M. DES GÉNÉRATEURS, SUR LE RENDEMENT DES MOTEURS.

En 1894, à la suite d'essais de laboratoire, le professeur Duncan, dans une conférence à l' « American institute of electrical engineers » appela l'attention sur l'influence de la courbe du courant d'un alternateur sur le fonctionnement des moteurs.

La société d'Oerlikon (1) entreprit des expériences sur un grand nombre de moteurs. Il ressort de ces expériences, que le fonctionnement d'un moteur bien construit, au démarrage, à la marche à vide, à la marche à pleine charge, est peu influencé, pratiquement, nullement influencé par le système de construction de l'alternateur et la forme de la courbe de son courant.

Par exemple, un moteur monophasé asynchrone d'Oerlikon de 10 chevaux, fonctionnant sous une tension de 220 volts, fut dans les mêmes conditions commandé, 1° par un alternateur du type Kapp avec enroulement à la surface, dont la courbe de courant est à peu près une sinusoïde, 2° par un alternateur d'Oerlikon (page 76) dont

(1) Voir un article de M. E. Kolben, paru dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* du 20 décembre 1894.

Digitized by Google

les spires étaient noyées dans le fer de l'armature et dont la courbe de courant est donnée figure 100, page 81.

On a obtenu les résultats suivants :

Fonctionnement avec un alternateur Kapp de 50 chevaux, 14 pôles, 430 tours à la minute, 2000 volts, transformateur de 20 k. w.

Effet utile		Tours	Tension	Courants	Watts
Chevaux	Watts	par minute	volts	ampères	fournis
0	0	1580	215	38	1100
2,5	1840	1575	215	33,5	2930
8,3	6100	1560	215	60	7600
11	8100	—	210	60	9800
12,2	9000	1520	210	70	11100
Démarrage à vide			210	45	—

Fonctionnement avec un alternateur d'Oerlikon de 100 chevaux, 12 pôles, 500 tours à la minute 2700 volts, transformateur de 15 k. w.

0	0	1520	215	33	1100
3,12	2300	—	212	34	3400
8,3	6100	1500	220	45	7400
9,8	7200	1494	220	48	8800
11,8	8700	1480	205	70	10800
Démarrage à vide			200	45	—

On voit bien d'après ces résultats que la forme de la courbe de l'alternateur, n'a pratiquement aucune influence.

L'influence du moteur sur la forme de la courbe du générateur est par contre beaucoup plus importante et peut dans certains cas être dangereuse. Dans certaines circonstances, une génératrice dont la courbe pour la marche à vide, ou avec une résistance extérieure non inductive, est peu différente d'une sinusoïde, peut donner une courbe très capricieuse, comme le montre la figure 179.

Les courbes de cette figure ont été relevées sur un alternateur triphasé de construction ancienne, avec armature à barres placée dans des trous. La courbe II relevée à vide diffère peu d'une sinusoïde. Lorsque l'alternateur actionné par une turbine commandait un moteur asynchrone de 200 chevaux qui actionnait un arbre de transmission d'une fabrique, simultanément avec une machine a vapeur munie d'un bon régulateur et d'un volant puissant, on obtenait la courbe III très irrégulière.

Digitized by Google

Outre l'accroissement des pertes dans le fer, du générateur des transformateurs et du moteur, dues aux doubles fluctuations du courant, l'augmentation de la tension maximum à deux graves inconvénients.

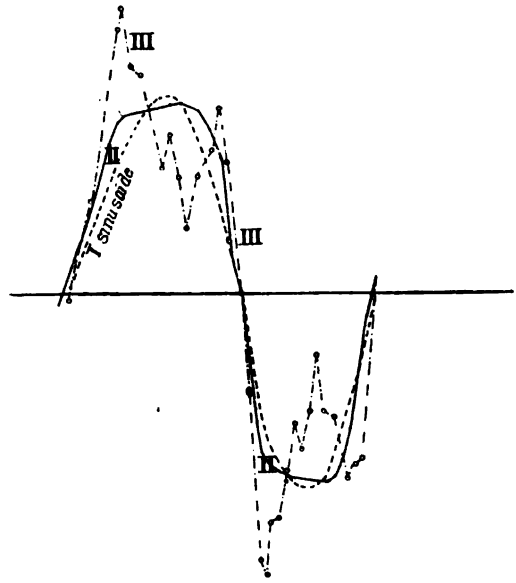


Fig. 179

1° L'isolement de l'installation est en danger.

2° La s. i. de la ligne et par suite le facteur d'impédance, sont accrus dans de grandes proportions, de même que la perte de tension en ligne, due à la résistance apparente.

La courbe dans les circonstances précédentes, serait tout aussi irrégulière, si l'alternateur à vide donnait une courbe exactement sinusoïdale.

Digitized by Google

CHAPITRE III

Les Transformateurs et les Condensateurs.

§ 1er. — PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES TRANSFORMATEURS

Dans le circuit primaire d'un transformateur, le courant est décalé d'un angle $-\varphi_1$, en arrière du flux magnétique (1er volume, page 93) c'est-à-dire d'un angle φ_1 en avant, et la f. e. m. appliquée d'un angle θ.

Comme on a :

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{4\pi k n_2^2}{r_2 \mathrm{R}} \qquad \operatorname{tg}\theta = \frac{4\pi k}{\mathcal{R}}\left(\frac{n_1^2}{r_1} + \frac{n_2^2}{r_2}\right)$$

on voit que $\theta > \varphi_1$ c'est-à-dire que le courant est décalé en arrière de la f. e. m.

Si ψ est l'angle de décalage de la f. e. m. et du courant, on a :

$$\operatorname{tg}\psi = \operatorname{tg}(\theta - \varphi_1) = \frac{4\pi k n_1^2 r_2^2 \mathcal{R}}{16\pi^2 k^2 n_2^2 \left\{r_2 n_1^2 + r_1 n_2^2\right\} + r_1 r_2^2 \mathcal{R}^2}$$

En appliquant la méthode graphique de Blakeslay, si OA (fig. 180), représente la direction du flux, OB faisant l'angle φ_1 avec OA, représentera le direction du courant, et OC faisant l'angle θ avec OA, la direction de la f. e. m. appliquée.

Prenons :

$$\mathrm{OB} = m\,\mathrm{I}_1$$

nous aurons :

$$\mathrm{BA} = \mathrm{OB}\sin\varphi_1 = m\,\mathrm{I}_1\sin\varphi_1 = m\frac{kn_2^2}{r_2 n_1}\Phi_0 \qquad (1^{er}\text{ volume page 95})$$

$$\mathrm{OA} = \mathrm{OB}\cos\varphi_1 = m\frac{\mathcal{R}}{4\pi n_1}\Phi_0$$

$$\overline{\mathrm{OB}}^2 = \overline{\mathrm{OA}}^2 + \overline{\mathrm{AB}}^2 = m^2\,\mathrm{I}_1^2 = m^2\left\{\frac{k^2 n_2^4}{r_2^2 n_1^2} + \frac{\mathcal{R}^2}{16\pi^2 n_1^2}\right\}\Phi_0^2$$

$$\mathrm{I}_1^2 = \left\{\frac{k^2 n_2^4}{r_2^2 n_1^2} + \frac{\mathcal{R}^2}{16\pi^2 n_1^2}\right\}\Phi_0^2$$

Digitized by Google

Relation que nous avons déjà trouvée (1er volume page 95). Le courant dans le circuit primaire est donc la résultante de deux courants décalés de $\frac{\pi}{2}$.

Si l'on pose :

$$I'_1 = \frac{k n_2^2}{r_2 n_1} \Phi_0 \qquad I''_1 = \frac{\mathcal{R}}{4\pi n_1} \Phi_0$$

on a :

$$I_1^2 = I_1'^2 + I_1''^2$$

mais :

$$I'_1 = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{k n_2}{r_2} \Phi_0 = \frac{n_2}{n_1} I_2$$

Le courant I'_1 est proportionnel à I_2, on peut l'appeler *le courant de travail*.

Le courant I''_1 est proportionnel au flux, c'est *le courant de magnétisation.*

Puisque le courant dans le secondaire est en retard de $\frac{\pi}{2}$ sur le flux (1er volume, page 95), on peut le représenter en direction par OB'.

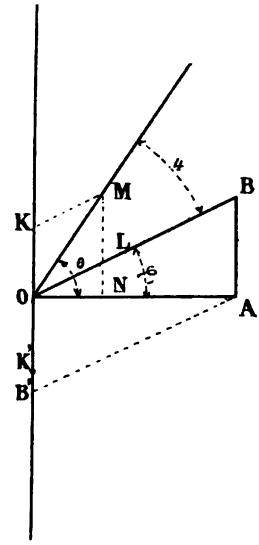


Fig. 180

$$OB' = BA = m \frac{n_2}{n_1} I_2$$

$$I_2 = \frac{n_1}{m n_2} OB'$$

La valeur maximum de la f. e. m. induite par le flux dans le circuit primaire (1er volume, page 94) est $k n_1 \Phi_0$, elle a la même direction que OB', en prenant :

$$OK' = m k n_1 \Phi_0 = \frac{m k n_1 r_2 n_1 BA}{m k n_2^2} = \frac{r_2 n_1^2}{n_2^2} BA$$

car :

$$\Phi_0 = \frac{r_2 n_1 BA}{m k n_2^2}$$

OK' représentera en grandeur et en direction la f. e. m. induite dans le primaire. La f. e. m. effective maximum est $r_1 I_1$ en prenant :

$$OL = m r_1 I_1 = r_1 OB$$

OL représentera en grandeur et en direction la f. e. m. effective qui est la résultante de la f. e. m. appliquée et de la f. e. m. induite,

Digitized by Google

en prenant OK = OK' et en traçant le parallélogramme, OM représentera en grandeur et direction la f. e. m. appliquée, on aura donc :

$$OM = m\,E_a$$

Il est facile de vérifier que MON = θ, en remplaçant dans la relation :

$$\text{tg MON} = \frac{ML + LN}{ON}$$

les longueurs par les valeurs qu'elles représentent, on trouve que :

$$MON = \theta.$$

En pratique, il faut aussi tenir compte des pertes par hystérésis et courants de Foucault.

Si p est la perte dans le fer dans un transformateur, pour la valeur de Φ_o correspondant à une charge donnée (nous verrons plus loin que Φ_o varie avec la charge), l'intensité maximum I_i''' du courant en concordance de phase avec la f. e. m. appliquée, nécessaire pour compenser cette perte sera donnée par la relation :

$$\frac{E_a\, I_i''}{2} = p \qquad I_i''' = \frac{2\,p}{E_a}$$

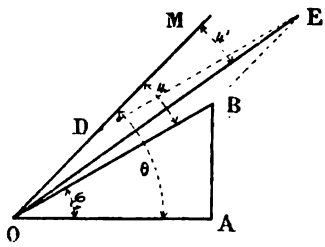


Fig. 181

Sur le diagramme (fig. 181) prenons $OD = m\,I_i'''$, en menant BE égal et parallèle à OD, OE représentera en grandeur et en phase le courant total dans le primaire, on aura :

$$OE = m\,I_i'$$

L'effet des pertes par hystérésis et par courants de Foucault, est donc d'augmenter l'intensité du courant circulant dans le primaire, dans le rapport de OE à OB et de diminuer le décalage entre la f. e. m. et le courant, car on a $\psi' < \psi$.

La puissance dépensée dans le primaire d'un transformateur est : (1er volume, page 98) :

$$(e_a i_1)_{moy} = \frac{1}{2}\left(\frac{k^2 r_1 n_2^2}{n_1^2 r_2^2} + \frac{r_1 \mathcal{R}^2}{16\,\pi^2 n_1^2} + \frac{k^2 n_1 n_2^2}{n_1 r_2}\right)\Phi_o^2 = \frac{1}{2}(r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2)$$

Digitized by Google

en tenant compte des pertes par hystérésis et courants de Foucault, on aura :

$$(e_a i_1)_{moy} = \frac{1}{2}(r_1 I_1'^2 + r_2 I_2^2)$$

r_2, résistance du circuit secondaire, varie en raison inverse de la charge (car la résistance de l'enroulement sur le transformateur est faible et peut être négligée). A vide, le secondaire étant ouvert, on a :

$$r_2 = \infty \qquad I_2 = 0$$

Si la f. e. m. appliquée efficace est constante, on a : (1er volume, page 96).

$$\Phi_o^2 = \frac{16\,\pi^2\,n_1^2\,r_2^2}{16\,\pi^2\,k^2\,(r_1\,n_2^2 + r_2\,n_1^2)^2 + r_1^2\,r_2^2\,\mathcal{R}^2}\,E_a^2$$

Il est facile de voir que Φ_0 augmente quand r_2 augmente, c'est-à-dire que la charge diminue. A vide, on aura :

$$\Phi_0^2 = \frac{16\,\pi^2\,n_1^2}{16\,\pi^2\,k^2\,n_1^4 + r_1^2\,\mathcal{R}^2}\,E_a^2$$

L'intensité maximum du courant de magnétisation est donnée par la relation :

$$I_1' = \frac{\mathcal{R}}{4\,\pi\,n_1}\,\Phi_o$$

Elle croit donc avec $\mathcal{R}$, résistance magnétique du transformateur, elle diminue quand k augmente, c'est-à-dire avec la fréquence (car Φ_o diminue quand la fréquence augmente). Elle croît également avec Φ_o, c'est-à-dire à mesure que la charge diminue.

L'intensité du *courant d'aimantation* à vide est :

$$I_1'^2 = \frac{\mathcal{R}^2}{16\,\pi^2\,k^2\,n_1^4 + r_1^2\,\mathcal{R}^2}\,E_a^2$$

elle augmente avec $\mathcal{R}$, et diminue quand r_1 augmente.

Le diagramme (fig. 182) permettra de déterminer l'intensité du courant dans le primaire à vide.

On prendra $OA = m.\ I_1''$.

Digitized by Google

$\operatorname{tg} \theta_1$, à vide sera donné par la relation :

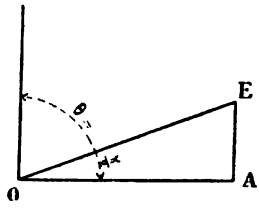


Fig. 182

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{4 \pi k n_1^2}{r_1 \mathcal{R}}$$

c'est-à-dire que si $\mathcal{R}$ est petit, on a $\theta_1 = 90°$.

On prendra $AE = m I_1''' = m \frac{2p}{E_a}$ (page 194).

(Il y a lieu de remarquer que les pertes par hystérésis et courants de Foucault, croissent avec Φ_0, car on a $B = \frac{\Phi_0}{S}$, S étant la section du noyau, de sorte qu'elles sont maxima à vide).

OE représentera l'intensité maximum du courant dans le primaire et θ' l'angle que fait O E avec la verticale, le décalage.

On a : (1er volume, page 95).

$$I_2^2 = \frac{k^2 n_2^2}{r_2^2} \Phi_0^2$$

$$\Phi_0^2 = \frac{16 \pi^2 n_1^2 r_2^2}{16 \pi^2 k^2 n_1^2 + r_2^2 \mathcal{R}^2} I_1^2$$

$$I_2^2 = \frac{16 \pi^2 n_1^2 n_2^2}{16 \pi^2 k^2 n_2^2 + r_2^2 \mathcal{R}^2} I_1^2$$

Si $\mathcal{R}$ est faible et si r_2 ne dépasse pas une valeur donnée (c'est-à-dire si la charge du secondaire est suffisante), on aura :

$$I_2^2 = \frac{n_1^2}{n_2^2} I_1^2$$

C'est-à-dire que si l'on maintient dans le primaire l'intensité efficace $\left(\frac{I_1}{\sqrt{2}}\right)$ constante, l'intensité efficace dans le secondaire sera également constante. Un *transformateur de faible résistance magnétique est donc pratiquement autorégulateur pour intensité constante.*

On voit que si E_a est maintenu constant, I_2 augmente à mesure que r_2 diminue, c'est-à-dire que l'intensité efficace dans le secondaire augmente à mesure que la charge augmente.

La valeur maximum de la différence de potentiel aux bornes du secondaire est :

$$E_2 = (r_2 - r_2') I_2$$

Digitized by Google

r_2' étant la résistance de l'enroulement secondaire, on aura donc :

$$E_1^2 = \frac{16\,\pi^2\,k^2\,n_1^2\,n_2^2\,(r_2 - r_2')^2}{16\,\pi^2\,k^2\,(r_1\,n_2^2 + r_2\,n_1^2)^2 + r_1\,r_2^2\,\mathcal{R}^2}\,E_a^2$$

Si les valeurs de r_1, de n_2 et de $\mathcal{R}$ sont peu élevées, on pourra négliger $r_1\,n_2^2$ (1) et $r_1\,r_2^2\,\mathcal{R}^2$.

(Car n_2 est faible vis-à-vis de n_1, $\frac{n_1}{n_2}$ étant le rapport de transformation) et on aura :

$$E_1^2 = \frac{n_1^2}{n_1^2}\,E_a^2$$

Un transformateur à faible résistance magnétique et à faible résistance de circuit primaire est pratiquement *autorégulateur pour potentiel constant.*

Le décalage entre la f. e. m. et le courant est plus petit que ψ (voir page 194).

Or, ψ augmente avec r_2, c'est-à-dire qu'il diminue avec la charge, pratiquement à partir d'une certaine charge, on peut admettre que le décalage réel $\psi' < \psi$ ou le facteur de puissance est nul (c'est ce que montrent du reste tous les résultats d'expériences que nous donnons plus loin), à vide on aura :

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{4\,\pi\,k\,n_1^2}{r_1\,\mathcal{R}} = \operatorname{tg} 0$$

Si $\mathcal{R}$ est très petit, on aura :

$$\operatorname{tg}\psi = \infty \qquad \psi = \frac{\pi}{2}$$

C'est-à-dire que le *courant de magnétisation* à vide est en retard de $\frac{\pi}{2}$ sur la f. e. m. appliquée.

Si I''' est l'intensité maximum du courant en phase avec la f. e. m. compensant les pertes par hystérésis et courants de Foucault, on aura (fig. 182) :

$$I_1^2 = I_1^2 + I'''^2$$

1. Ceci ne s'applique naturellement qu'à un transformateur dans lequel la tension dans le secondaire est plus faible que dans le primaire, sans cela on aurait $n_2 > n_1$.

Digitized by Google

Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault, diminuent avec la charge, soit dans le cas où l'intensité efficace du primaire est maintenue constante, soit dans le cas où la f. e. m. aux bornes du primaire est maintenue constante.

On a, en effet (1er volume, pages 95 et 96).

$$\Phi_0^2 = \frac{16\,\pi^2\,n_1^2\,r_2^2}{16\,\pi^2\,k^2\,n_2^4 + r_2^2\,\mathcal{R}^2}\,I_1^2$$

$$\Phi_0^2 = \frac{16\,\pi^2\,n_1^2\,r_2^2}{16\,\pi^2\,k^2\,(r_1\,n_2^2 + r_2\,n_1^2)^2 + r_1^2\,r_2^2\,\mathcal{R}^2}\,E_a^2$$

On voit que si l'on maintient soit E_a soit I_1 constant, dans les deux cas, Φ_0 augmente, quand r_2 augmente, c'est-à-dire quand la charge diminue.

En pratique, si r_1 est faible, comme n_2 est petit, on voit que la diminution est peu importante et que l'on peut admettre sans grande erreur que Φ_0 est constant pour toutes les charges, dans un transformateur fonctionnant sous potentiel constant.

En pratique, on se donne généralement les valeurs efficaces, des f. e. m. et des intensités des courants, il suffira dans les relations données de remplacer les valeurs maxima, par les valeurs efficaces multipliées par $\sqrt{2}$.

En pratique, les valeurs des intensités, des f. e. m. et des résistances, sont prises en ampères, volts et ohms, tandis que les inductions magnétiques et les résistances magnétiques sont exprimées en unités C. G S. Il faudra dans les relations données, où toutes les quantités sont exprimées en unités C. G. S., remplacer les intensités par leurs valeurs en ampères multipliées par 10^{-1}, les f. e. m. par leurs valeurs en ampères multipliées par 10^8 et les résistances par leurs valeurs en ohms, multipliées par 10^9.

Si E_1^e, I_1^e, E_2^e, I_2^e, représentent les valeurs efficaces en volts et en ampères, r_1, r_2 les résistances en ohms, les relations principales pourront être écrites :

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{4\,\pi\,k\,n_2^2}{10^9\,r_2\,\mathcal{R}}$$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{4\,\pi\,k}{10^9\,\mathcal{R}}\left(\frac{n_1^2}{r_1} + \frac{n_2^2}{r_2}\right)$$

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{4\,\pi\,k\,n_1^2\,r_2^2\,\mathcal{R}\,10^9}{16\,\pi^2\,k^2\,n_2^2\left\{r_2\,n_1^2 + r_1\,n_2^2\right\} + r_1\,r_2^2\,\mathcal{R}^2\,10^9}$$

Digitized by Google

$$I_2^e = \frac{k\, n_2}{\sqrt{2}}\, \Phi_o$$

$$I_1^{e\,2} = \frac{10^8}{2}\left\{\frac{k^2\, n_1^4}{10^{18}\, r_2^2\, n_1^2} + \frac{\mathcal{R}^2}{16\, \pi^2\, n_1^2}\right\} \Phi_o^2$$

$$I_1^{e'} = \frac{n_2}{n_1} I_2^e = \frac{k\, n_2^2}{\sqrt{2}\, 10^8\, r_2\, n_1}\, \Phi_o \cdot \text{ (Intensité efficace du courant de travail).}$$

$$I_1^{e''} = \frac{10\, \mathcal{R}}{4\, \sqrt{2}\, \pi\, n_1}\, \Phi_o \text{ . (Intensité efficace du courant de magnétisation)(1).}$$

$$\Phi_o^2 = \frac{2.\ 10^{16}\, \pi^2\, n_1^2\, r_2^2}{16\, \pi^2\, k^2\, (r_1\, n_2^2 + r_2\, n_1^2)^2 + 10^{18}\, r_1^2\, r_2^2\, \mathcal{R}^2}\, E_1^{e\,2}$$

Quand r_1 et $\mathcal{R}$ sont très faibles, ou quand r_2 est très grand, on a :

$$\Phi_o = \frac{\sqrt{2}\ 10^8\ E_1^e}{k\, n_1} = \frac{\sqrt{2}\, E_1^e\ 10^8}{2\, \pi\, F\, n_1}$$

F étant la fréquence.

C'est la relation que nous avons appliquée au calcul du champ magnétique des moteurs asynchrones (page 182) pour lesquels $n_2 = o$ et $r_2 = \infty$.

Un transformateur est toujours formé d'un ou deux noyaux en tôle feuilletée, entouré par les spires des circuits primaire et secondaire. Donc pour une forme donnée de la section, la longueur d'une spire de l'un ou l'autre circuit, sera à peu près proportionnelle à la racine carrée de la surface de la section.

La section du cuivre ne peut être augmentée dans de grandes proportions, afin de réduire les pertes par échauffement, premièrement à cause du prix de revient et ensuite parce que dans les transformateurs à circuit magnétique fermé, comme le fer enveloppe complètement le cuivre, une augmentation de la section du cuivre, entraîne une augmentation correspondante du volume du fer.

Influence de l'induction magnétique maximum.

Si les sections des fils d'un transformateur sont données, ainsi que le nombre de spires du primaire et par conséquent du secondaire (on a $\frac{n_1}{n_2} = \alpha$, rapport de transformation) Φ_o sera facilement calculé, au moyen de la relation donnée ci-dessus.

1. Dans la relation de la page 187, on a : $\frac{\mathcal{R}}{\sqrt{2}} = 2\, a_1\, B_1^3 + \frac{l_1}{\mu_1} + \frac{l_2}{\mu_2}$

Digitized by Google

Dans ce cas, la forme du transformateur et les rapports des dimensions de ses diverses parties étant connues, il n'y a plus qu'une quantité variable, c'est B, l'induction magnétique maximum que l'on doit admettre, on a :

$$S = \frac{\Phi_o}{B}$$

le volume sera proportionnel à $\sqrt{S^3} = S^{1,50}$, la perte dans le cuivre sera proportionnelle (à peu de chose près) à $\sqrt{S} = S^{0,50}$ et comme on a :

$$S^{1,50} = \frac{{\Phi_o}^{1,50}}{B^{1,50}} \qquad S^{0,50} = \frac{{\Phi_o}^{0,50}}{B^{0,50}}$$

la perte totale dans le transformateur pourra s'écrire, si F est la fréquence :

$$P = (a\ F\ B^{1,6} + a'\ F^2\ B^2)\ \frac{1}{B^{1,5}} + \frac{a''}{B^{0,50}}$$

$$P = a\ F\ B^{0,1} + a'\ F^2\ B^{0,5} + \frac{a''}{B^{0,50}}$$

On voit donc qu'il y aura une certaine valeur de B, rendant la perte minimum, cette valeur sera trouvée en égalant la dérivée à zéro :

$$0{,}1\ a\ FB^{-0,9} + 0{,}5\ a'\ F^2\ B^{-0,5} - 0{,}5\ a''\ B^{-1,5} = 0$$
$$0{,}5\ a'\ F^2\ B + 0{,}1\ a\ FB^{0,6} - 0{,}5\ a'' = 0$$

Il est facile de voir que la valeur de l'induction rendant la perte minimum est d'autant moindre que la fréquence est plus élevée.

Les valeurs pratiques à admettre pour B, suivant la fréquence, sont les mêmes que pour les alternateurs et les moteurs, elles sont données à la page 96.

Influence de la section du noyau.

Si toutes les valeurs sont déterminées, à l'exception de Φ_o et de n_1 et si les rapports des dimensions des diverses parties du transformateur sont données, on aura :

$$S = \frac{\Phi_o}{B} = \frac{a}{n_1}$$

Digitized by Google

Si on diminue S, on diminue les pertes par hystérésis et par courants de Foucault, mais alors n_1 (et par conséquent n_2) augmente c'est-à-dire que la perte par suite de la résistance des circuits augmente. (Il est vrai que si S diminue la longueur des spires diminue, mais pas aussi vite que n_1 augmente, de sorte que la longueur totale des fils augmente à mesure que S diminue).

Il y a donc une valeur déterminée de S qui rend les pertes minima pour une charge donnée.

Influence de la résistance des circuits magnétiques.

Il est facile de voir que la valeur de tg ψ augmente avec $\mathcal{R}$ (p. 192) tant que l'on a :

$$16\,\pi^2\,k^2\,n_1^2\left\{r_2\,n_1^2+r_1\,n_2^2\right\} > r_1\,r_2^2\,\mathcal{R}^2$$

relation qui est toujours satisfaite en pratique.

Le décalage dans le primaire augmente donc quand la résistance des circuits magnétiques augmente.

Cet effet est encore augmenté par la dispersion du flux, qui augmente avec $\mathcal{R}$ (voir page 202.)

L'augmentation du décalage entraîne à des pertes supplémentaires dans tout le réseau primaire (si on n'a pas pris de dispositions spéciales pour annuler le décalage) car pour transporter la même puissance, il faut augmenter l'intensité efficace du courant, c'est-à-dire augmenter les pertes en ligne.

Si on ne tient pas compte des pertes par hystérésis et courants de Foucault, le rendement diminue quand $\mathcal{R}$ augmente (1er volume page 98).

Influence de la résistance du circuit primaire.

La perte par échauffement augmente, naturellement avec r_1.

En outre, si r_1 dépasse une certaine valeur, le transformateur peut ne plus être pratiquement autorégulateur, car on ne plus alors négliger le terme $r_1\,n_2^2$ dans la relation de la page 197.

Influence de la fréquence.

La relation de la page 199 montre que n_1 et Φ_0 diminuent proportionnellement à la fréquence, c'est-à-dire que pour une induction maxi-

Digitized by Google

mum donnée. la section du transformateur est inversement proportionnelle à la fréquence c'est-à-dire que le volume sera inversement proportionnel à $F^{\frac{3}{2}}$.

La diminution des dimensions ne sera pas aussi forte, car on ne peut y admettre une induction magnétique B aussi élevée que dans un transformateur pour courant à fréquence plus faible (page 200).

Cependant un transformateur sera d'autant plus petit (pour une puissance donnée) et par conséquent coûtera d'autant moins cher que la fréquence sera plus élevée.

Effet de la dispersion des lignes de force (1).

Jusqu'ici, nous avons admis que toutes les lignes de force traversaient les circuits primaire et secondaire. En pratique il est impossible d'arriver à le réaliser complètement et il y a toujours un certain nombre de lignes de force perdues par dispersion.

Le taux des lignes de force traversant une spire, varie dans le même circuit, cependant supposons que toutes les spires d'un même circuit soient traversées par le même flux.

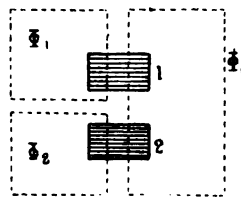


Fig. 183

On peut alors diviser le flux total en trois parties (fig. 183) :

1° Une partie d'intensité maximum Φ_0 traversant les deux circuits, c'est le flux utile, celui dont nous avons tenu compte dans tous les calculs. Sa valeur instantanée est :

$$\Phi_0 \sin kt.$$

2° Un partie d'intensité maximum Φ_1 traversant seulement le circuit primaire. Ce flux est en phase avec le courant primaire. Sa valeur instantanée est :

$$\Phi_1 \sin (kt - \varphi_1)$$

3° Une partie d'intensité maximum Φ_2 traversant seulement le circuit secondaire, ce flux est en phase avec le courant secondaire et sa valeur instantanée est :

$$\Phi_2 \sin (kt - \varphi_2)$$

1. G. Kapp, *Dynamos alternators and transformers.*

Digitized by Google

La valeur instantanée de la f, e. m. induite dans le primaire par le flux Φ_1 sera :

$$- k n_1 \Phi_1 \cos (kt - \varphi_1)$$

et celle induite dans le secondaire par le flux Φ_2 sera :

$$- k n_2 \Phi_2 \cos (kt - \varphi_2).$$

Il est facile de voir que ces flux jouent le rôle de s. i. et que l'on aura le même résultat, en supposant que le flux dans le transformateur est Φ_0 et en plaçant dans le primaire une s.i. de valeur $L_1 = n_1 \Phi_1$ et dans le secondaire une s. i. de valeur $L_2 = n_2 \Phi_2$.

La dispersion du flux a donc pour effet d'augmenter le décalage entre la f. e. m. et le courant tant dans le primaire que dans le secondaire.

La dispersion augmente naturellement dans un transformateur : 1° avec la résistance du circuit magnétique, 2° avec la valeur de l'induction maximum.

Les dérivations diminuent le rendement d'un transformateur, en effet, si L_1 et L_2 sont les coefficients de s.i. du primaire et du secondaire et M le coefficient d'induction mutuelle.

Sans dérivations, on a :

$$L_1 L_2 = M$$

Avec dérivations :

$$M = \sqrt{L_1 L_2}\,(1 - x)$$

Le rendement étant (1er volume, page 97) :

$$R' = 1 - \frac{r_1 r^2_2 + k^2 r_1 L^2_2}{r_1 r^2_2 + k^2 r_1 L^2_2 + k^2 r^2 M^2}$$

diminue quand M diminue.

Influence des joints du circuit magnétique.

D'après les expériences de MM. Ewing et Low, l'influence des joints du circuit magnétique est très forte dans un circuit fermé, mais par contre, elle est négligeable, dès que le circuit contient un entrefer un peu considérable.

Voici l'influence des joints rapportée en couche d'air :

Digitized by Google

Induction	Couche d'air correspondante en mm.
4000	2,6
6000	3,0
8000	3,1
10000	3,1
12000	3,5
14000	3,7

M. Ewing estime que cette résistance n'est pas due à l'épaisseur du joint, mais l'attribue, d'après sa théorie, à la discontinuité de la réaction des aimants élémentaires.

Influence de la variation de perméabilité du noyau.

Nous avons étudié cette question dans le premier volume (page 271) et vu que la forme de la courbe du courant dans le secondaire est modifiée. Comme le secondaire réagit sur le primaire, la courbe du courant dans le primaire est également modifiée. Dans les transformateurs modernes, où l'induction maximum est faible, cette influence se fait moins sentir que dans les anciens transformateurs

§ 2. — CLASSEMENT DES ALTERNATEURS ET CONSIDÉRATIONS SUR LES CIRCUITS MAGNÉTIQUES

Le noyau de fer du transformateur est entouré, aussi étroitement que possible (afin de réduire la longueur des spires et par conséquent les pertes par échauffement) par les circuits primaire et secondaire, en ne réservant que les espaces nécessaires pour l'isolation. Les spires des deux circuits sont aussi rapprochées que possible, sans qu'il y ait danger pour l'isolation (par suite de la grande différence de tension entre les deux circuits). Les spires des deux circuits peuvent être alternées, ou bien le circuit primaire entoure complètement le circuit secondaire. Dans tous les cas, l'ensemble des spires du primaire et du secondaire forme un anneau que l'on peut appeler *l'anneau de cuivre.*

On peut diviser les transformateurs en deux grandes catégories :

1° Les transformateurs *à circuit magnétique ouvert;*

2° Les transformateurs *à circuit magnétique fermé.*

Dans les transformateurs à circuit magnétique ouvert, l'anneau de

Digitized by Google

cuivre entoure un cylindre de fer ayant à peu près la même longueur que lui et le circuit magnétique se ferme à travers l'air.

Dans les transformateurs à circuit magnétique fermé, le fer a lui-même la forme d'un anneau.

Ces transformateurs peuvent être constitués par :

1° Un anneau de fer et un anneau de cuivre.

a) L'anneau de cuivre entourant complètement l'anneau de fer. (Fig. 198, page 218).

b) L'anneau de fer entourant complètement l'anneau de cuivre. (Fig. 199, page 218).

c) L'anneau de cuivre entourant partiellement l'anneau de fer. (Fig. 184).

2° Un anneau de fer et deux anneaux de cuivre. (Fig. 185).

3° Un anneau de cuivre et deux anneaux de fer. (Fig. 186).

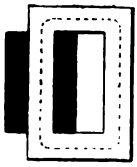


Fig. 184

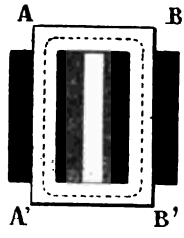


Fig. 185

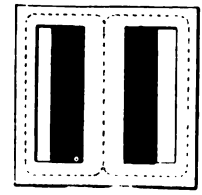


Fig. 186

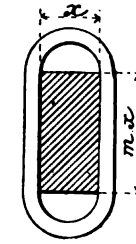


Fig. 187

On peut aussi avoir plusieurs transformateurs réunis en un seul, ou un transformateur à circuits multiples.

Les transformateurs à circuit magnétique fermé peuvent donc se subdiviser en :

a) Transformateurs à circuit magnétique simple.

b) Transformateurs à circuits magnétiques multiples.

Quand le noyau a une section circulaire, la longueur des spires qui l'entourent est minimum pour une surface donnée. Quand le noyau est formé de fils de fer, on peut facilement lui donner une section circulaire, mais quand il est formé de feuilles de tôle isolées, comme cela a lieu dans les transformateurs modernes, on a avantage à prendre toutes les feuilles de mêmes dimensions, c'est à-dire à donner au noyau une forme rectangulaire.

Dans ce cas, la longueur d'une spire est minimum quand la section est carrée.

Digitized by Google

Dans les transformateurs du genre Westinghouse, la bobine entourant le noyau rectangulaire a la forme indiquée sur la figure 186. Si x est la largeur du noyau et mx sa hauteur, on a :

$$m x^2 = S = \text{const.}$$

La longueur de la spire est :

$$(2m + \pi) x$$

On doit donc chercher la valeur de m rendant minimum l'expression :

$$(2m + \pi)^2 x^2 = \frac{4m^2 + 4\pi m + \pi^2}{m} S = \left(4m + 4\pi + \frac{\pi^2}{m}\right) S$$

on aura :

$$4 - \pi^2 m^{-2} = 0$$

$$m^2 = \frac{\pi^2}{4} \qquad m = \frac{\pi}{2} = 1{,}58$$

Nous avons vu (page 201) que pour le noyau entouré par l'anneau de cuivre, il y a une section pour laquelle à une charge donnée, le total des pertes dans le fer et dans le cuivre est minimum. Si la charge pour laquelle on veut la perte totale minimum diminue, il est facile de voir que la section du noyau doit diminuer, étant donné naturellement que l'induction maximum dans le fer reste constante.

Dans les parties du fer d'un transformateur qui ne sont pas entourées de cuivre, on peut diminuer les pertes par hystérésis et courants de Foucault, en augmentant la section, ce qui diminue l'induction maximum.

Ainsi par exemple, dans les parties AB et A'B' du transformateur représenté sur la figure 185, il y aura avantage à prendre la section aussi grande qu'on le pourra, (sans augmenter par trop le prix de revient de l'appareil).

En effet, on peut augmenter la section sans augmenter la longueur, c'est-à-dire que le volume est proportionnel à S, comme B est inversement proportionnel à S $\left(B = \frac{\Phi_0}{S}\right)$, la perte par hystérésis et courants de Foucault par c.m³. sera de la forme :

$$\frac{a}{S^{1,6}} + \frac{b}{S^2}$$

Digitized by Google

la perte totale sera de la forme :

$$\frac{a}{S^{0.5}} + \frac{b'}{S}$$

c'est-à-dire qu'elle diminuera à mesure que S augmentera.

Lorsque le volume du fer non entouré de cuivre augmente plus vite que la section, il y a alors une section qui donne un minimum de perte.

Soit (fig. 188) un transformateur du type Westinghouse, les bobines étant enroulées en AB autour du noyau, les dimensions de ce dernier qui est un rectangle de côtés a et b, sont données, on cherche quelle est la valeur de m, qui rend la perte dans le fer minimum.

La fréquence est naturellement donnée.

Si B est l'induction maximum dans le noyau, l'induction maximum dans les autres parties sera $\frac{B}{2m}$

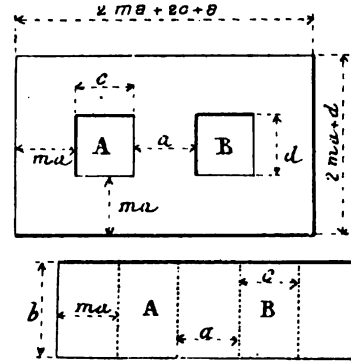


Fig. 188

puisque le transformateur est à double circuit magnétique.

La perte par c. m.^{3} dans le fer, en dehors du noyau, sera de la forme :

$$\frac{\alpha}{m^{1.5}} + \frac{\beta}{m^2}$$

Le volume total du transformateur est :

$$(2\,m\,a + 2\,c + a)\,(2\,m\,a + d)\,b$$

Le volume du fer du noyau et des vides est :

$$2\,b\,c\,d + b\,d\,a$$

Le volume du fer, dans lequel l'induction varie, est :

$$2\,m^2\,a^2\,b + 2\,m\,(2\,c + a + d)\,a\,b = 2\,a\,b\,(2\,m^2\,a + m\,a')$$
$$a' = 2\,c + a + d$$

La perte par hystérésis et courants de Foucault, dans la portion du fer dans laquelle l'induction varie, est :

$$2\,a\,b\,(2\,m^2\,a + m\,a')\left(\frac{\alpha}{m^{1.5}} + \frac{\beta}{m^2}\right)$$

Digitized by Google

Il faut donc chercher la valeur de m, rendant minimum l'expression :

$$2\,m^{0,4}\,a\,\alpha + 2\,a\,\beta + \frac{a'\,\alpha}{m^{0,8}} + \frac{a'\,\beta}{m}$$

En prenant la dérivée par rapport à m, on aura :

$$0{,}8\,m^{-0,8}\,a\,\alpha - 0{,}6\,m^{-1,8}\,a'\,\alpha - m^{-2}\,a'\,\beta = 0$$

$$0{,}8\,m^{1,4} - 0{,}6\,a'\,\alpha\,m^{0,4} - a'\,\beta = 0$$

Exemple. — Dans le noyau, on a, B = 5000; la fréquence étant F = 50, les tôles ont une épaisseur de 0,05 c. m.

On a en outre :

$$b = 1{,}57\,a \qquad c = 1{,}50\,a \qquad d = 2\,a$$

En prenant (1er volume, page 270) $\eta = 0{,}003$, la perte due à l'hystérésis, sera par c. m³ de fer du noyau (voir la table de la page 107).

$$4{,}1431 \times 0{,}003 = 0{,}0124 \text{ watts}$$

L'épaisseur de la tôle étant de 5 dixièmes de m. m., la perte par courants de Foucault, par c. m³ de fer du noyau sera (table de la page 107).

$$5 \times 5 \times 0{,}0001 = 0{,}0025$$

On aura donc :

$$\alpha = \frac{0{,}0124}{2^{1,8}} = 0{,}0041$$

$$\beta = \frac{0{,}0025}{4} = 0{,}000625$$

$$a' = (2\,c + a + d) = (3 + 1 + 2) = 6\,a$$

L'équation à résoudre est :

$$0{,}8\,\alpha\,m^{1,4} - 3{,}60\,\alpha\,m^{0,4} - 6\,\beta = 0$$

$$0{,}00328\,m^{1,4} - 0{,}015\,m^{0,4} - 0{,}00375 = 0$$

$$328\,m^{1,4} - 1500\,m^{0,4} - 380 = 0$$

On trouve m compris entre 4 et 5. Il y aura lieu d'examiner, s en prenant $m = 4$, on n'arrive pas à un poids, c'est-à-dire à un prix trop élevé pour le transformateur.

Digitized by Google

§. 3. — DES DIVERS MODES D'EMPLOI DES TRANSFORMATEURS.

Les transformateurs peuvent être employés, soit à élever, soit à abaisser la tension dans un réseau donné.

Dans le cas d'une distribution de puissance, ils fonctionnent presque tout le temps à pleine charge et naturellement ils doivent donner un rendement aussi élevé que possible à cette charge.

Il en est de même pour les transformateurs employés dans les stations centrales, quand on ne les branche sur le réseau qu'au fur et à mesure de la demande, soit automatiquement, soit en les plaçant dans des sous-stations où un employé est chargé de la manœuvre.

Quand, dans une station centrale, les transformateurs sont constamment branchés, ils fonctionnent pendant la plus grande partie de la journée, soit à vide, soit à faible charge, et alors les conditions ne sont plus les mêmes.

M. Picou, dans une remarquable étude sur le rendement des transformateurs (1), a indiqué un mode de représentation très commode du fonctionnement de ces appareils (fig. 189).

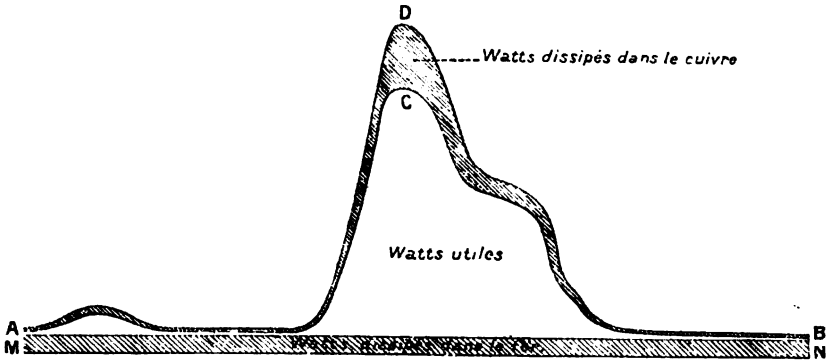


Fig. 189

Si la courbe ABC représente la consommation payante d'une journée, c'est-à-dire la puissance fournie par le transformateur pendant une journée de vingt-quatre heures, la puissance fournie au transformateur pourra être représentée en ajoutant au-dessous de la courbe un rectangle, dont l'ordonnée est proportionnelle à la puissance perdue par hystérésis et par courants de Foucault et en aug-

1. *Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, de novembre 1892.

Digitized by Google

mentant ensuite toutes les ordonnées de la courbe d'une quantité proportionnelle aux pertes dans le cuivre à la charge représentée par l'ordonnée.

Les pertes sont donc représentées par les deux surfaces hachurées, et le rapport de la surface totale donne le rendement moyen journalier du transformateur. Il est facile de voir que le rendement moyen est beaucoup inférieur au rendement à pleine charge.

Le diagramme permet de se rendre facilement compte de l'importance énorme des pertes dans le fer.

C'est dans le but de diminuer les pertes dans le fer que M. Swinburn a proposé de revenir aux transformateurs à circuit magnétique ouvert, ce qui permet de diminuer beaucoup le volume du fer et par conséquent de diminuer les pertes par hystérésis et courants de Foucault ; par contre, la résistance magnétique $\mathfrak{R}$ est très forte (nous avons étudié page 201 l'influence de l'augmentation de $\mathfrak{R}$).

D'après les résultats de cette étude, on voit que les transformateurs à circuit magnétique ouvert sont excellents, dans le cas d'une distribution où l'on a pris les dispositions nécessaires pour annuler les décalages du courant par rapport à la f. e. m.

Dans le cas d'une distribution ordinaire, le transformateur a un rendement moyen excellent si on le considère seul, mais par contre, le rendement total de la distribution est ordinairement, inférieur à celui que l'on obtient en employant un transformateur à circuit magnétique fermé, car le décalage étant augmenté, l'intensité dans les conducteurs doit être plus grande pour la même puissance, de sorte que les pertes par résistance sont augmentées.

Dans une distribution où l'en n'emploie pas des dispositions pour annuler le décalage, il vaut donc mieux employer des transformateurs à circuit magnétique fermé. On calcule alors le transformateur pour que le rendement moyen de la journée soit maximum, c'est-à-dire pour que le rendement à la charge moyenne soit maximum.

§ 4. — DESCRIPTION DES TRANSFORMATEURS LES PLUS EMPLOYÉS

1° *Transformateurs à circuit magnétique ouvert.*

Transformateur Gaulard et Gibbs.

MM. Gaulard et Gibbs démontrèrent les premiers, la possibilité de l'emploi industriel des transformateurs.

Digitized by Google

Leur transformateur est à noyau droit constitué par un faisceau de fils de fer. Le primaire et le secondaire sont formés par des rondelles de cuivre mince, ayant la forme indiquée sur la figure 190. La liaison entre deux rondelles consécutives d'un même enroulement a

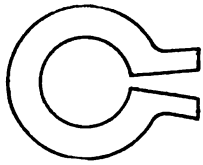


Fig. 190

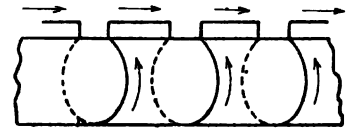


Fig. 191

lieu au moyen des oreillettes, comme l'indique le schéma (fig. 191), de sorte que l'on obtient pour chacun des deux circuits une sorte d'hélice.

Les rondelles sont isolées entre elles par du vernis et des feuilles de papier parcheminé.

Toutes les rondelles ou spires du circuit primaire sont montées en tension, celles du circuit secondaire peuvent être reliées de plusieurs manières, en tension ou en dérivation.

Les premières expériences eurent lieu à Londres au chemin de fer métropolitain, le circuit avait environ 20 k. m. de longueur. Les transformateurs étaient montés en tension dans le circuit et les secondaires alimentaient des lampes à arc et à incandescence. M. le docteur Hopkinson trouva que le rendement atteignait 86 à 89 %.

En 1884, eurent lieu les célèbres expériences de transport de puissance à l'Exposition de Turin.

A l'Exposition était installé un alternateur Siemens actionné par un moteur de 30 chevaux; le circuit primaire constitué par une ligne aérienne en bronze chromé de 3,7 m. m. de diamètre, avait une longueur de près de 80 k. m. Les transformateurs montés en série, étaient placés dans quatre sous-stations et alimentaient des lampes à arc et à incandescence. MM. Galileo Ferraris et Roiti firent les essais du rendement, qui s'élevait à 91 %.

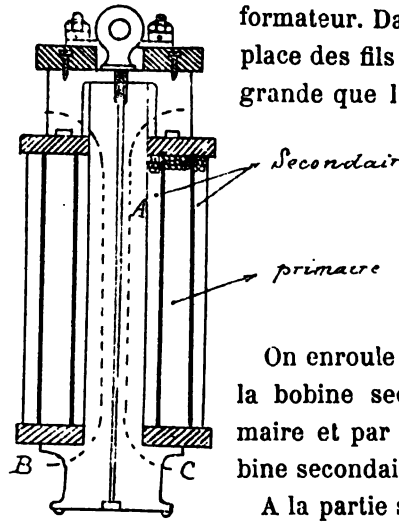
Transformateur hérisson de M. Swinburn.

Nous avons indiqué, page 210, les raisons qui déterminaient M. Swinburn à revenir aux transformateurs à circuit magnétique ouvert.

Un noyau en bronze A (fig. 192) ayant une section en forme de

Digitized by Google

croix et portant à sa partie inférieure quatre ressauts BC, servant d'appuis à la joue inférieure des bobines, forme la carcasse du transformateur. Dans les quatre angles de la croix, on place des fils de fer doux ayant une longueur plus grande que les bobines, ces fils sont recourbés aux extrémités, comme le montre le tracé en pointillé, de manière à diminuer le chemin des lignes de force dans l'air ; c'est de l'aspect de ces fils que vient le nom de hérisson donné à l'appareil.



On enroule d'abord sur le noyau la moitié de la bobine secondaire, puis toute la bobine primaire et par dessus la seconde moitié de la bobine secondaire.

A la partie supérieure est fixé au moyen d'une vis, un plateau en bronze qui serre fortement les fils de fer.

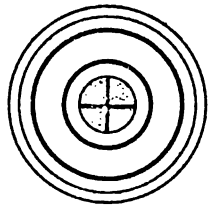


Fig. 192

MM. Bedell, Muller et Wagner (1) ont tracé, par la méthode des contacts instantanés au moyen d'un jet d'eau (voir chapitre VIII), les diverses courbes des courants et des f. e. m. d'un transformateur hérisson construit pour 60 lampes, devant fonctionner sous une tension de 1.000 v. avec une fréquence de 130.

Le primaire avait 1,426 spires de fil de 1,83 m. m. de diamètre, disposées en 12 couches, sa résistance était de 2,748 ohms, le poids du cuivre de 13,6 kgs. Le secondaire avait 73 tours de câble formé de 19 brins de 1,47 m.m. de diamètre, la résistance était de 0,0149 ohms et le poids du cuivre de 5,68 kilogrammes.

Pour les essais, les expérimentateurs se servirent d'un alternateur Westinghouse donnant une différence de potentiel efficace constante de 1154 v. avec une fréquence de 133.

Les mesures ont été prises au moyen d'un voltmètre multicellulaire

1. *Transactions of the American Institute of electrical engineers*. Octobre 1893.

Digitized by Google

Thompson ; des lampes à incandescence soigneusement calibrées servant de résistance non inductive.

Les opérateurs procédèrent à deux séries d'expériences, la première, en n'employant pas de condensateur, la deuxième en annulant le décalage du courant de ligne au moyen de condensateurs.

Expériences sans emploi de condensateurs.

La charge dans le circuit secondaire étant obtenue au moyen de lampes à incandescence ; les expérimentateurs tracèrent les courbes pour la marche à vide pour la charge de 15, 30, 45 et 60 lampes.

Les courbes pour la marche à vide et pour la charge de 45 lampes (2.740 watts dans le secondaire) sont données (fig. 193 et 194).

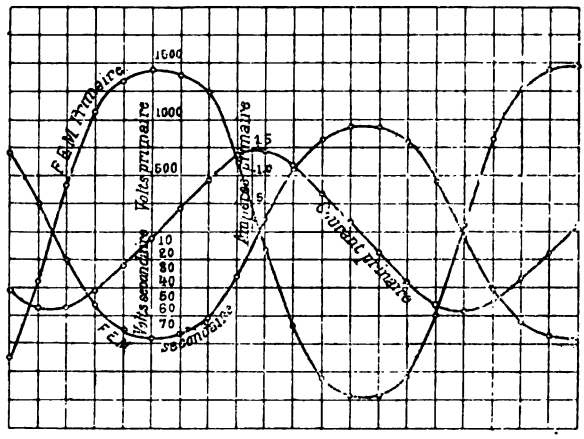


Fig. 193

On voit que, à vide, la f. e. m. secondaire est exactement opposée à la f. e. m. primaire, c'est-à-dire à 180° en arrière, et que le courant primaire est à plus de 90° en arrière de la f. e. m. primaire.

A la charge de 45 lampes $\left(\frac{2}{3}\right.$ de la charge normale$\left.\right)$, le décalage entre la f. e. m. et le courant primaire est d'environ 24° et à pleine charge, d'environ 20° ; on voit donc que le décalage est beaucoup plus élevé que dans un transformateur à circuit magnétique fermé.

Sur les courbes de la figure 194, on voit que la f.e.m. secondaire est décalée de plus de 180° par rapport à la f. e. m. primaire, ce qui

Digitized by Google

provient des dérivations du flux magnétique augmentant avec la charge.

La puissance absorbée à vide est de 39,6 watts, les pertes dans le

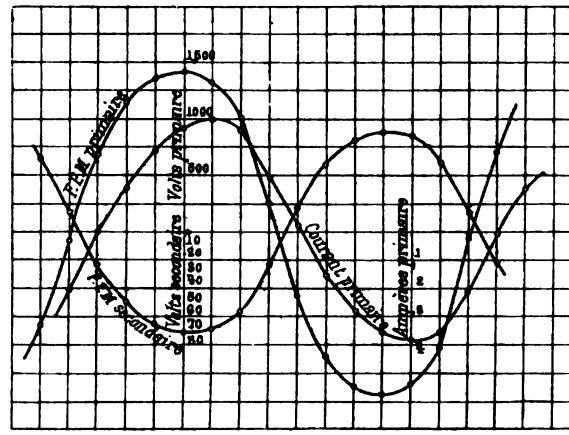


Fig. 194

cuivre étant de 2,58 watts (l'intensité efficace du courant de magnétisation étant presque de un ampère) et les pertes par hystérésis, etc., de 37,02 w.

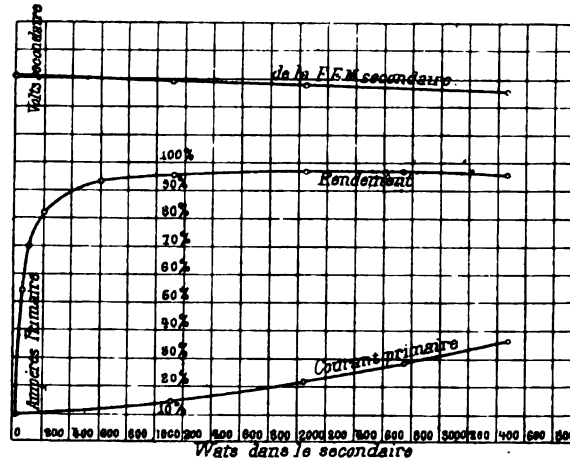


Fig. 195

Les courbes de la figure 195 donnent : le rendement, l'intensité du courant dans le primaire et la chute de la f. e. m. aux bornes du

Digitized by Google

secondaire en fonction de la charge, le rendement aux deux tiers de la charge atteint 96,6 %.

Le rendement du transformateur considéré seul est donc excellent, mais comme l'intensité du courant de magnétisation est très grande, les pertes en ligne sont augmentées de ce fait, et peuvent compenser et au delà le gain réalisé dans le transformateur.

Expériences avec emploi de condensateurs.

On a procédé au tracé des mêmes courbes en intercalant entre les bornes du primaire une capacité en dérivation, de manière à réduire l'intensité efficace du courant de ligne.

Les expérimentateurs disposaient, à cet effet, de six condensateurs de la Stanley electric C°, pouvant résister à une différence de potentiel de 500 v. (voir § 8, même chapitre) ayant une capacité de 1,5 microfarads environ. En les disposant de diverses manières en parallèle ou en cascade, on pouvait, sans que la différence de potentiel aux bornes dépasse 500 volts, obtenir des capacités allant de 0,25 à 2,25 microfarads.

La capacité amenant la coïncidence de phase entre le courant de ligne et la f. e. m. avait été calculée, elle était de un microfarad environ, l'expérience a prouvé que le calcul était juste. Pour celà on a disposé les condensateurs de diverses manières jusqu'à ce que l'on ait obtenu le courant de ligne minimum, et on arriva à mettre les condensateurs par trois en cascade, les deux séries étant mises en parallèle, on avait ainsi une capacité de 1,00 microfarad environ.

$$\left(\frac{2 \times 1{,}50}{3} = 1{,}00\right)$$

On procèda à trois relevés, l'un à vide, l'autre à la charge de 15 lampes, et le troisième à la charge de 45 lampes.

Les résultats des essais sont donnés dans le tableau suivant :

Charge	Intensité du courant dans le primaire	Intensité du courant de ligne
0	0,95	0,187
15 lampes (1012 w.)	1,24	0,867
45 lampes (2740 w)	3,07	2,730

On voit qu'à vide l'intensité du courant est cinq fois plus faible

Digitized by Google

dans la ligne que dans le primaire, ou bien que la valeur qu'elle atteindrait sans emploi de condensateur.

Les figures 196 et 197 donnent les diverses courbes pour la marche à vide et pour la charge de 45 lampes.

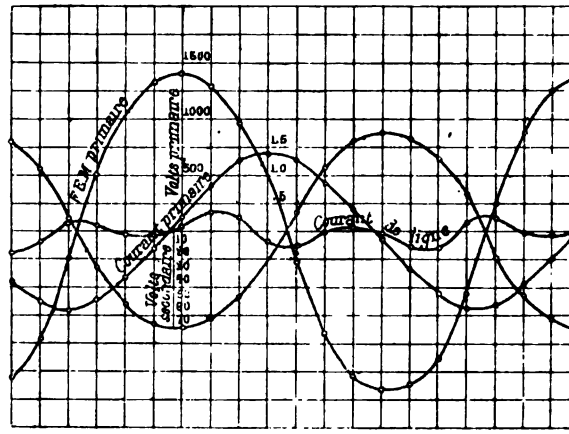


Fig. 196

Le courant de ligne est la somme algébrique du courant primaire et du courant de condenseur; si les courants étaient exactement sinusoïdaux, il serait en phase exacte avec la f. e. m. Comme on le voit

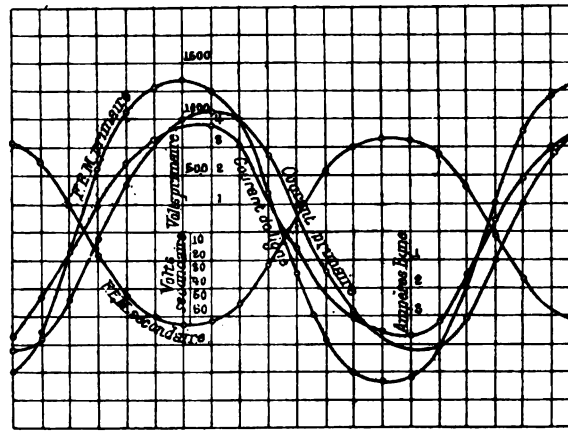


Fig. 197

sur la figure 197, cela est pratiquement réalisé. Sur la figure 196, le courant de ligne est très irrégulier; il a une fréquence plus élevée que

Digitized by Google

la f. e. m. Ceci provient de ce qu'il est la somme algébrique de deux courants qui ne sont pas absolument sinusoïdaux.

Ces expériences confirment les résultats de la théorie, c'est-à-dire que, dans le cas où la ligne a une résistance assez élevée, il n'y a pas avantage à employer des transformateurs à circuit magnétique ouvert, car alors les pertes en ligne dues à l'intensité élevée du courant de charge peuvent atteindre une valeur supérieure à l'économie réalisée dans le transformateur, à moins que l'on ne prenne des dispositions pour annuler les décalages.

2° *Transformateurs à circuit magnétique fermé.*

a. *Transformateurs à circuit magnétique simple.*

Transformateur Brown.

Ce transformateur est du type à circuit magnétique simple (fig. 194) Les bobines primaire et secondaire sont enroulées concentriquement sur un noyau droit, et le circuit magnétique est complété par un paquet de tôle en forme de ⊔, dont les deux extrémités viennent s'appliquer contre les extrémités du noyau des bobines. Les joints sont ajustés au rouge et pour que le joint magnétique soit aussi parfait que possible, une vis de pression vissée dans le bâti, vient appuyer la partie en forme de ⊔ sur le noyau.

Les enroulements de tous les transformateurs sont préalablement cuits dans l'huile. Pour la haute tension, les enroulements baignent dans une huile isolante, dans laquelle ils ont été préalablement cuits afin d'enlever l'humidité.

Les données suivantes s'appliquent à un transformateur de 20.000 watts.

Charge	Rendement	Charge	Rendement
20.000 w.	0,967	4 000 w.	0,88
15.000 w.	0,96	3.000 w.	0,86
10.000 w.	0,95	2.000 w.	0,80
5.000 w.	0,91	1.000 w.	0,69

Transformateur Ganz (Zipernowski, Déry et Blathy).

Les anciens transformateurs Ganz avaient, soit la forme indiquée, sur la figure 198, soit sur la figure 199.

Dans le premier transformateur, le noyau était constitué par une

Digitized by Google

couronne de fil de fer doux, et les enroulements primaires *a* et secondaires *b* (fig. 198) étaient disposés alternativement à la surface.

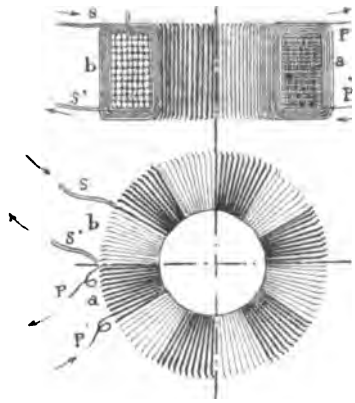


Fig. 198

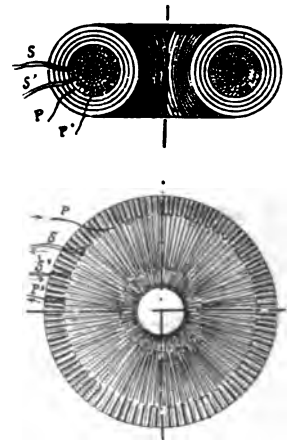


Fig. 199

Dans le second transformateur, un premier anneau, formé par la bobine secondaire, était entouré par la bobine primaire, et le tout était enveloppé par du fil de fer doux, enroulé sur l'anneau de section circulaire (fig. 199).

Actuellement, la maison Ganz construit ses transformateurs d'après le type de la figure 198, mais le noyau est constitué par des plaques de tôle isolées. Ces feuilles de tôle ont la forme d'un disque évidé, et l'ensemble forme un anneau de section rectangulaire. Les disques sont maintenus par des joues placées radialement (fig. 200).

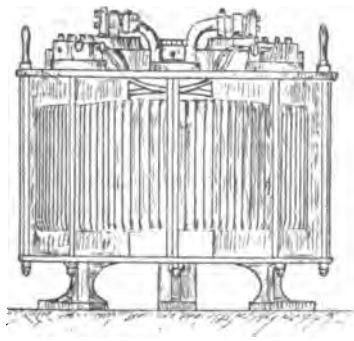


Fig. 200

La bobine primaire est enroulée tout autour de l'anneau et recouverte par la bobine secondaire. Les joues sont fixées haut et bas à des disques de fer; sur le disque supérieur sont placées les bornes et les plombs fusibles.

En 1890, une commission, nommée par la ville de Francfort constata qu'à pleine charge, le rendement atteignait 95 à 96 %; à demi-charge 93 à 94 %; à quart de charge 90 %, et à huitième de charge 80 %.

Digitized by Google

Les courbes de la figure 201 donnent le rendement aux diverses charges et la chute de potentiel aux bornes du secondaire, en fonction de la charge, pour un transformateur Ganz de 7,5 k. w.

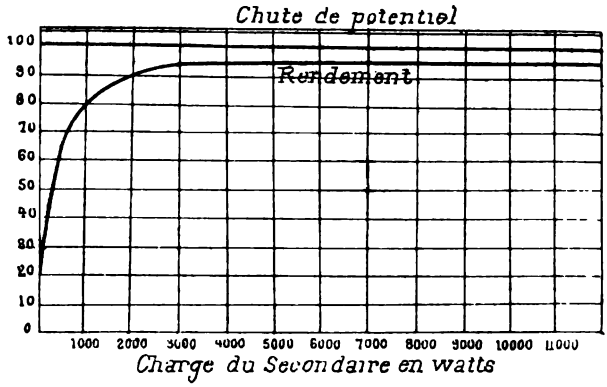


Fig. 201

L'Institut électrotechnique fédéral suisse a soumis à des essais un transformateur Ganz de 4 k. w., tension primaire normale 900 v.; tension secondaire 100 v., afin de déterminer l'augmentation des pertes dans le fer, due à une augmentation de la tension.

Les résultats des essais sont indiqués dans le tableau suivant :

Fréquence	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Tension primaire E_1, en volts.	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Pertes dans le fer P, en watts.	23,1	36,5	53,4	70,6	92,2	116,9	140,8	166,5	195,3
$E_1^{1,65}$ P	530	539	531	543	537	523	532	535	535

On voit donc que l'on peut admettre que le produit $E_1^{1,65}$ P est constant.

Transformateur Labour (1).

Le circuit magnétique de ce transformateur, construit par la société l'*Éclairage électrique*, est formé par des feuilles de tôle, isolées entre

1. D'après un article de M. G. Roux, paru dans l'*Industrie électrique*, du 25 avril 1893.

Digitized by Google

elles, ayant la forme indiquée sur la figure 202, c'est-à-dire rappelant la disposition des inducteurs de la dynamo Rechniewski.

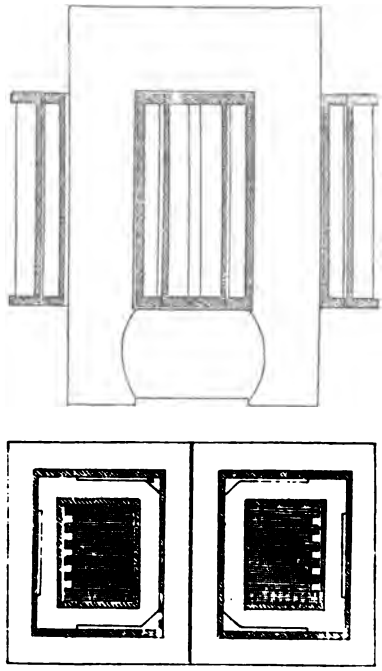


Fig. 202

Le circuit est complété par un cylindre en tôle feuilletée, qui entre à force dans le vide ménagé dans le fer à cheval; des étriers permettent de serrer fortement l'ensemble pour diminuer la résistance magnétique.

Comme le montre la figure 202, les plaques de tôle n'ont pas toutes la même largeur, de manière à former des canaux qui concourent à la ventilation.

Les tôles en fer ou bois de 0,4 $^{m}/^{m}$ d'épaisseur, sont isolées entre elles par du papier gommé, laqué.

Les bobines inductrice et induite sont enroulées séparément sur des formes cloisonnées en bois durci et séché, imprégné à chaud d'une substance isolante, telle que la gomme laque ou le bitume de Judée. Les distances entre la bobine primaire extérieure et la bobine secondaire, ainsi qu'entre cette dernière et le noyau, dépendent de la tension à laquelle est soumis le transformateur.

Les fils sont isolés à la soie, et par des rubans trempés dans un induit à base de gomme laque, se vitrifiant à la chaleur.

L'ensemble du transformateur est serré par des plaques de fonte et posé sur des semelles en bois (fig. 203).

Lorsque la tension dans le primaire atteint une certaine valeur, le transformateur est placé dans une caisse qui est remplie d'un isolant, se liquéfiant par la chaleur. Un regard, fermé par une planchette fixée par deux vis, sert à vérifier le niveau de l'isolant sans déplacer le couvercle.

Comme le montre la courbe de la figure 204, le rendement de ces transformateurs est excellent, même à faible charge.

Digitized by Google

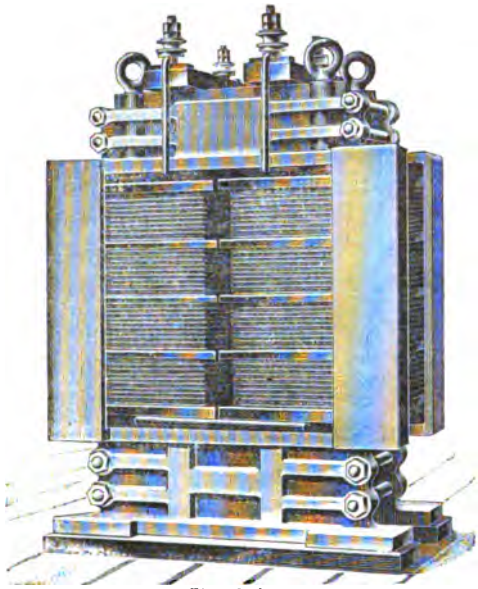


Fig 203

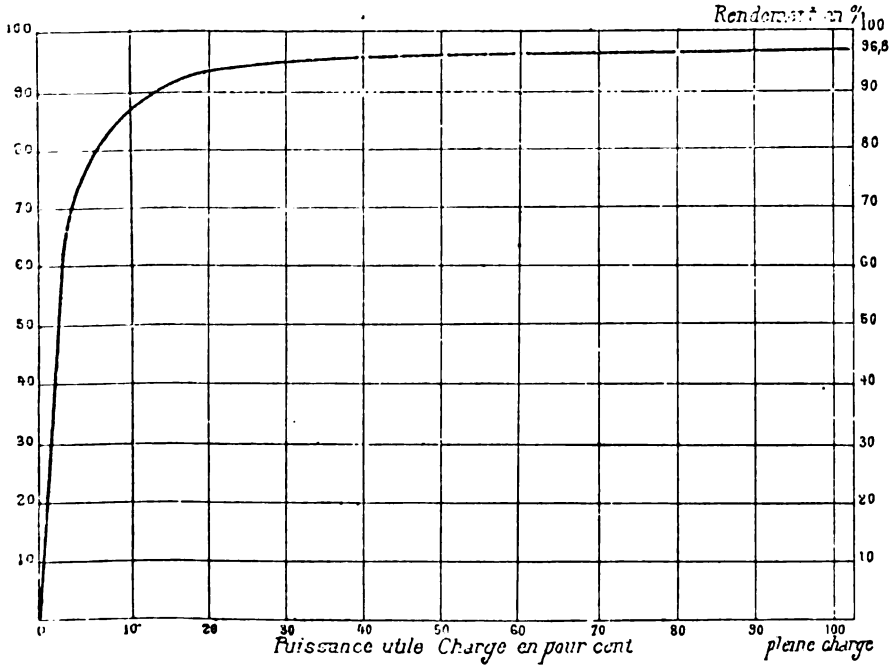


Fig. 204

Transformateur Lowrie-Hall.

Le transformateur est constitué par deux paquets de tôles rectan-

Digitized by Google

gulaires, isolées au papier. Sur chacun des paquets est d'abord enroulé une bobine primaire, puis par dessus une bobine secondaire.

Chacun de ces paquets, formant une moitié du transformateur, les tôles dépassent les bobines de part et d'autre. Les extrémités de ces tôles sont ensuite recourbées et emboîtées les unes dans les autres, de manière à constituer un circuit fermé, comme l'indique la fig 205.

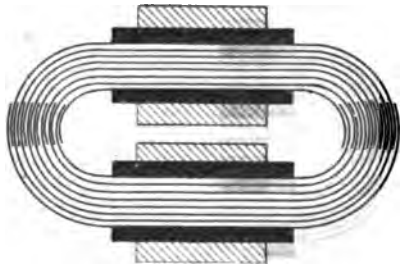


Fig. 205

L'ensemble est ensuite placé dans une caisse en fonte, de manière à ce que les deux faisceaux de tôle soient fortement comprimés, afin de diminuer la résistance magnétique.

Les deux bobines secondaires, ainsi que les deux bobines primaires, sont placées en tension. Les extrémités des deux circuits aboutissent à des bornes installées, ainsi que les fils fusibles, dans des boîtes en porcelaine placées sur la caisse en fonte.

Ces transformateurs sont employés par la « House-to-House Company, » à sa station centrale de West-Brompton à Londres.

b) ***Transformateurs à double circuit magnétique.***

Transformateur Cail-Helmer.

Ce transformateur est à circuits magnétiques de résistance variable.

Des plaques de tôle, rectangulaires, évidées à leur partie centrale, comme l'indique la figure 206, sont empilées avec interposition de papier isolant et serrées fortement entre deux plaques de fonte S, S (fig. 207) reliées par des boulons.

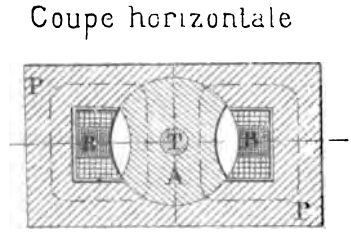


Fig. 206

La bobine primaire B, ainsi que les deux moitiés de la bobine secondaire, qui l'entourent, est disposée comme l'indiquent les figures, de manière à créer deux flux magnétiques dont les lignes moyennes sont indiquées en pointillé.

Digitized by Google

Dans la partie centrale circulaire est enfoncé un cylindre formé par des tôles empilées, monté sur une tige centrale T. Ce cylindre qui entre à frottement doux dans la cavité ménagée dans les plaques P, porte deux évidements, et peut tourner autour de son axe.

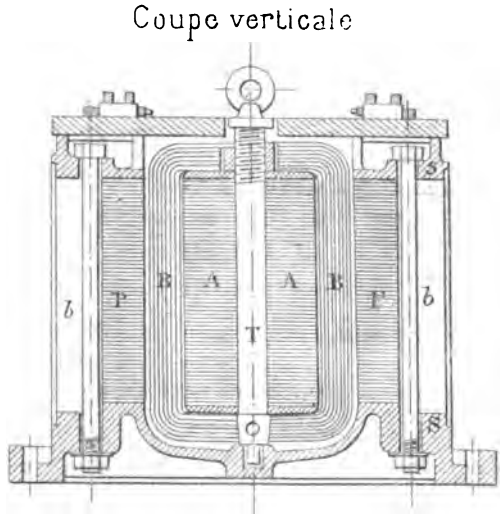


Fig. 207

Quand le cylindre occupe la position indiquée sur la figure 206, la résistance magnétique est minimum, quand on le fait tourner de 90° autour de son axe, la résistance magnétique devient maximum.

Comme dans la formule de la page 195, donnant la valeur Φ_o, induction totale maximum en fonction de E_a, la résistance magnétique $\mathfrak{R}$ entre au dénominateur, Φ_o diminue quand $\mathfrak{R}$ augmente. Comme Φ_o diminue, les pertes par hystérésis et courants de Foucault diminuent.

On peut donc, avec un pareil transformateur, augmenter la résistance magnétique quand la charge diminue et par conséquent diminuer l'importance des pertes par hystérésis et courants de Foucault.

Il est également facile de se rendre compte, en considérant la formule de la page 197 donnant la valeur de la f. e. m. aux bornes du secondaire, qu'en augmentant la résistance magnétique quand la charge diminue, on peut rendre la tension secondaire absolument constante, quelle que soit la charge.

Les données suivantes sont relatives à un transformateur Cail-

Digitized by Google

Helmer de 10 k. w., pour une tension primaire de 2.000 v. et une tension secondaire de 110 v. à la fréquence de 60.

Section du fer du circuit magnétique, en dehors du cylindre central.	245 c.m.²
Longueur du circuit magnétique.	88 c.m.
Induction magnétique maximum (C. G. S.). . .	5.630
Poids total du fer.	208 kgs.
Nombre de spires du circuit primaire	545
Densité du courant dans le circuit primaire en ampères par m/m.².	1,28
Nombre de spires du circuit secondaire	30
Densité du courant dans le circuit secondaire en ampères par m/m.².	1,6

Transformateur Ferranti.

Les bobines primaire et secondaire sont enroulées sur un faisceau de plaques de tôle isolées les unes des autres et enchevêtrées comme l'indique la figure 208, de manière à former deux circuits magnétiques distincts.

Dans le système Ferranti, les transformateurs dits de sous-station, abaissent la tension de 10.000 v. à 2.400 environ et d'autres transformateurs placés chez les abonnés abaissent ensuite la tension de 2.400 v. à 100 ou 50 volts.

Les transformateurs de 150 chevaux, destinés à abaisser la tension de 9.600 à 2.400 v. c'est-à-dire ayant un rapport de transformateur de 4 à 1, sont construits de la manière suivante :

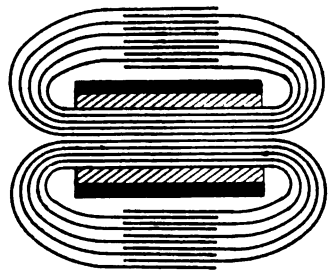


Fig. 208

Il y a trois bobines dont l'une pour le circuit primaire, est intercalée entre les deux autres constituant le circuit secondaire. Chacune de ces bobines est constituée par des éléments formés d'un ruban de cuivre enroulé et dont les spires, comme dans les bobines de l'alternateur du même constructeur (page 40) sont séparées les unes des autres par des bandes de fibre vulcanisée. Ces éléments sont enroulés de toile imprégnée de gomme

Digitized by Google

laque et placés les uns au-dessus des autres, avec interposition de lames de fibre vulcanisée, sont reliés en tension.

Les bobines primaire et secondaire sont séparées par des plaques d'ébonite laissant entre elles des vides considérables, pour la circulation de l'air ou de l'huile.

Les diverses lames de tôle formant les circuits magnétiques sont séparées les unes des autres par des vides de 1,20 c. m., pour la ventilation ou pour la circulation de l'huile, dans le cas où le transformateur doit être immergé.

Transformateur Mordey.

Le transformateur Mordey est du même genre que le transformateur Thomson-Houston et le transformateur Westinghouse, que nous étudierons plus loin.

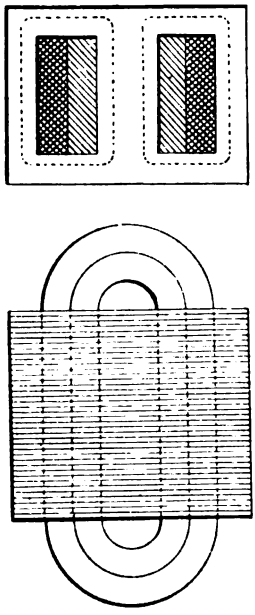


Fig. 209

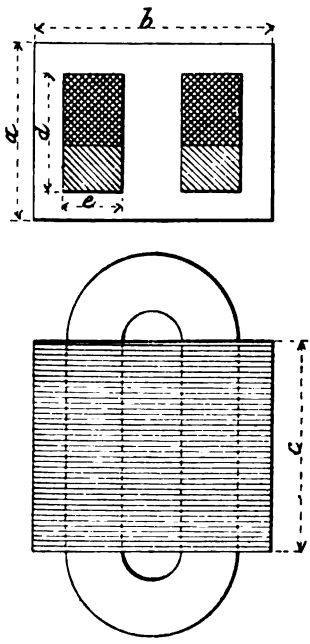


Fig. 210

Ce genre de transformateur est constitué comme l'indiquent les figures 209 et 210 par deux bobines, qui sont placées soit à côté l'une de l'autre (fig. 209), soit au-dessus l'une de l'autre (fig. 210). Ces bobines de forme allongée sont noyées dans un prisme rectangulaire constitué par des tôles isolées, de manière à constituer un double

Digitized by Google

circuit magnétique. La différence entre les divers transformateurs, provient de la manière dont sont découpées les feuilles de tôle pour arriver à enfermer les bobines, préalablement enroulées, dans les deux canaux ménagés dans le prisme.

Dans le transformateur Mordey, la bobine secondaire est enroulée sur une mince carcasse évidée, en bois dur imprégné d'ozokérite et la bobine primaire est placée par dessus.

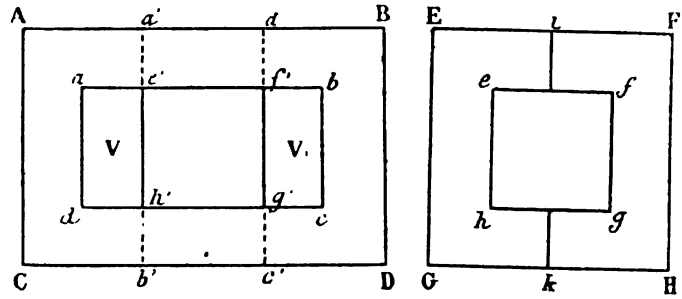


Fig. 211

On enfile d'abord sur la bobine une tôle rectangulaire ABCD (fig. 211) évidée suivant *abcd*, puis le circuit magnétique est complété en plaçant à l'intérieur de la bobine, en *e' f' g' h'*, une tôle rectangulaire *efgh* enlevée de la tôle EFGH. On place ensuite le papier isolant et par dessus, en A*a' e' a d h' b'* C, la plaque de tôle de même forme, obtenue en coupant en deux suivant la ligne *i k*, ce qui reste de la plaque de

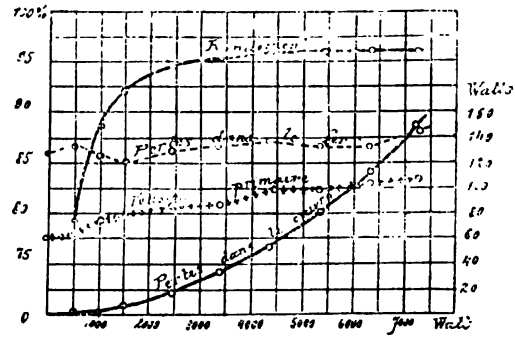


Fig. 212

tôle EFGH. Les circuits magnétiques sont complétés en plaçant suivant *a' d' c' b'*, la partie *abcd*, enlevée de la première plaque de tôle. On isole au papier et on enfile par dessus les bobines une nouvelle plaque évidée, etc.

Digitized by Google

On continue ainsi à alterner les divers joints jusqu'à ce que l'on ait atteint la longueur voulue pour le prisme de fer. Le tout est ensuite maintenu par une enveloppe en fonte et fortement serré au moyen de vis. Les bornes, les interrupteurs et les plombs de sûreté sont montés sur un bloc de porcelaine, dans un espace ménagé dans l'enveloppe de fonte.

La commission de l'Exposition de Francfort, sous la présidence de M. le professeur Weber, de Zurich, a procédé à l'essai de deux transformateurs du système Mordey, construits par MM. Kremenzky, Mayer et Cie, de Vienne, de 3 et 6 k. w. avec une tension primaire de 2.000 v., la tension secondaire étant de 100 v. et la fréquence de 100.

Les courbes de la figure 212 donnent les résultats des essais pour le transformateur de 6 k. w.

La courbe de la tension primaire donne la tension efficace que l'on devrait fournir pour que la tension secondaire reste constante (100 v.).

Le tableau suivant donne la valeur du cosinus de l'angle de décalage entre la f. e. m. primaire et le courant, c'est-à-dire du facteur de puissance, on voit que, même à faible charge, le cos. est à peu près égal à l'unité, c'est-à-dire que le décalage est négligeable.

SÉRIE D'ESSAIS N° 1		SÉRIE D'ESSAIS N° 2	
Charge	cos ψ'	Charge	cos ψ'
6302 w.	0,999	6261 w.	0,997
5329	1,000	5299	1,000
4327	1,000	4352	0,998
3370	1,001 (?)	3457	1,000
2437	1,001	2438	0,992
1485	0,997	1488	0,987
994	0,980	1008	0,985
528	0,975	531	0,948

La charge du circuit secondaire était obtenue au moyen de lampes à incandescence, c'est-à-dire que pratiquement ce circuit était dépourvu de s. i.

Digitized by Google

Transformateur d'Oerlikon.

Le noyau du transformateur est constitué par un faisceau de tôles

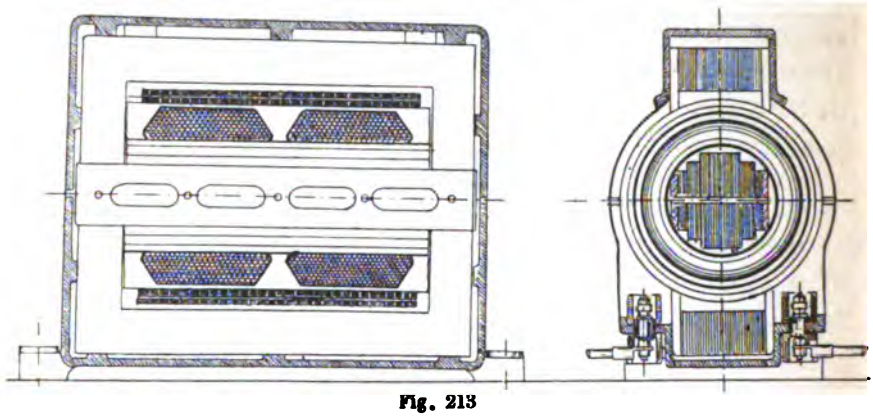


Fig. 213

isolées entre elles, ayant les formes indiquées sur la coupe transversale de la figure 213. La bobine secondaire est enroulée sur une carcasse enveloppant le noyau droit en tôle feuilletée et la bobine primaire entoure la bobine secondaire.

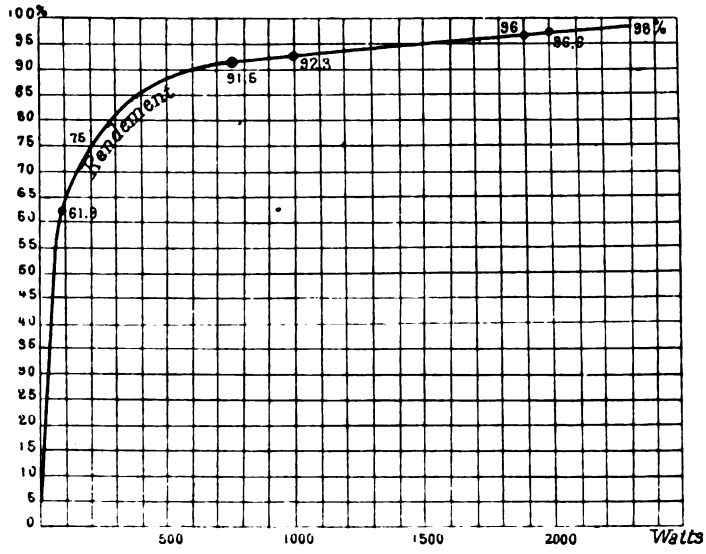


Fig. 214

Les deux circuits magnétiques sont fermés au moyen de tôles en forme de ⊓ placées haut et bas, comme l'indique la coupe longitudinale.

Digitized by Google

La courbe de la figure 214 donne le rendement d'un transformateur d'Oerlikon de 2 k. w.

La Commission de l'Exposition de Francfort a procédé à des essais sur un transformateur d'Oerlikon de 7,5 k. w. 2.000 v., primaire, 100 v. secondaire. Ce transformateur construit pour une fréquence de 50, n'a pu être essayé qu'à la fréquence de 100, ce qui naturellement a modifié les conditions du fonctionnement.

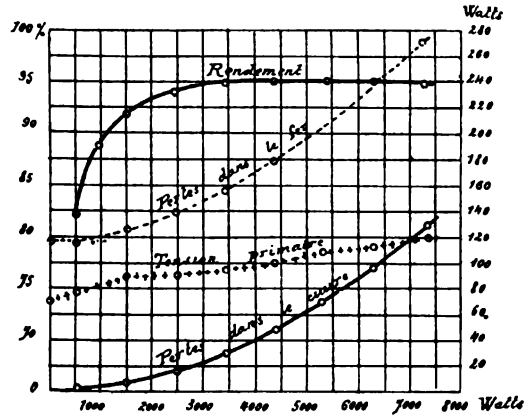


Fig. 215

Les courbes de la figure 215 donnent le rendement, les pertes dans le fer et dans le cuivre ainsi que la tension qu'il faut appliquer aux bornes du primaire, pour avoir à une charge quelconque, la tension constante de 100 v. aux bornes du secondaire.

Au sujet du rendement, il y a lieu de remarquer que les pertes dans le fer diminuent quand la fréquence augmente, ainsi qu'il ressort des résultats des essais d'un transformateur d'Oerlikon de 3 k.w. fait par l'Institut électrotechnique fédéral de Zurich, indiqués ci-dessous (1) :

Fréquence	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	52.5	57.5
Pertes dans le fer . . .	77.7	72.2	66.6	61.8	58.0	56.7	55.0

1. En effet, si on se rapporte à l'équation générale des transformateurs :

$$\Phi_0 = s\,B = \frac{\sqrt{2}\ E^e\ 10^8}{2\,\pi\,F\,n_1} \qquad \text{(page 199)}$$

On voit que s, section du fer du noyau, n_1 nombre de spires du primaire, etc... restant constants, B, l'induction maximum diminue quand F augmente, de sorte que les pertes dans le fer diminuent également.

Digitized by Google

Le rendement du transformateur à la fréquence de 50 serait, donc légèrement plus faible que celui indiqué sur la courbe.

Par contre, à la fréquence normale, la variation de la tension primaire pour maintenir la tension secondaire constante, est un peu plus faible que celle donnée par la courbe.

En effet, si $E_{2,0}$ est la tension aux bornes du secondaire à vide, E_2 la tension à une charge donnée, on a :

$$\frac{E_{2,0} - E_2}{E_{2,0}} = \frac{1}{r_2}\left\{ r'_2 + r_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 + \frac{2\pi F (L_1 L_2 - M^2)}{L_1} \sin \varphi_1 \right\}$$

r_2 étant la résistance totale du circuit secondaire, correspondant à la charge donnée, r'_2 la résistance de la bobine secondaire, L_1 et L_2 les coefficients de s. i. des circuits primaire et secondaire. M le coefficient d'induction mutuelle.

Quand la fréquence augmente, les deux premiers termes ne varient pas, par contre, le troisième augmente, puisqu'il contient F et que sin φ_1 augmente aussi, car on a :

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{4\pi k n_2^2}{r_2 \mathfrak{R}} \qquad \text{et } k = 2\pi F$$

La perte de puissance dans le fer (fig. 215) augmente rapidement avec la charge, ceci provient de ce que le transformateur soumis aux essais était muni d'une enveloppe extérieure en fer non feuilleté de sorte que quand la charge augmentait, les dérivations magnétiques dans cette enveloppe augmentaient. Les nouveaux transformateurs d'Oerlikon ne sont pas munis de cette enveloppe en fer.

Le tableau suivant donne la valeur du cosinus de l'angle de décalage entre la f. e. m. primaire et le courant, aux diverses charges.

1re série d'essai		2e série d'essai	
Charge en watts	cos ψ'	Charge en watts	cos ψ'
7241	0,997	7329	0,997
6307	1,002	6328	0,996
5305	0,996	5344	1,000
4376	1,001	4402	1,000
3429	0,996	3405	1,001
2454	0,992	2472	1,003
1497	0,999	1505	0,996
535	0,984	534	0,980

Digitized by Google

Transformateur Thomson-Houston.

La forme générale du transformateur Thomson-Houston est donnée figure 209.

Dans les premiers types, les tôles empilées avaient la forme d'un double T (fig. 216), AB*f e' p l c* CD *g o n e* A, les deux bobines étaient enroulées, la primaire sur la secondaire, dans les espaces V V_1 et les circuits magnétiques étaient complétés par les deux coins *e f g h* et *i j k l*, constitués également par des tôles empilées.

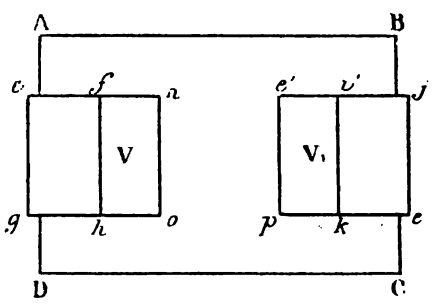


Fig. 216

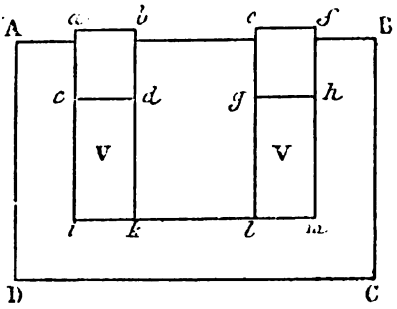


Fig. 217

Actuellement les tôles empilées ont la forme d'un E (fig. 217), les bobines sont enfilées dans les vides V V_1 et les circuits magnétiques sont complétés par les deux coins en tôles empilées *a b c d* et *e f g h*.

M. Thomson-Houston a également construit des transformateurs pour courant secondaire constant; dans l'un d'eux, à double circuit magnétique, la bobine secondaire est suspendue au-dessus de la bobine primaire, au moyen d'un fléau, avec contrepoids.

Quand l'induction varie, la bobine secondaire se déplace relativement à la bobine primaire, de manière que l'intensité du courant qui la traverse reste constante.

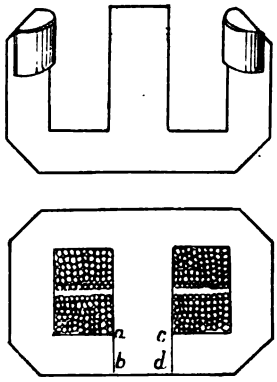


Fig. 218

Tranformateur Westinghouse.

Le transformateur Westinghouse est du type indiqué sur la figure 209.

La figure 218 montre la manière de constituer les circuits magnétiques; les tôles estampées sont coupées suivant les lignes *a b* et

Digitized by Google

c d, et les portions relevées comme l'indique la figure. On enfile ensuite la plaque qui a alors la forme d'un E sur les bobines et on rabat

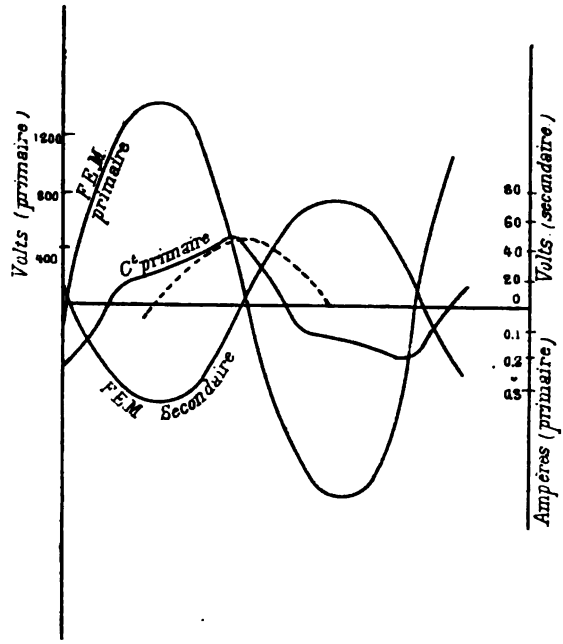


Fig. 219

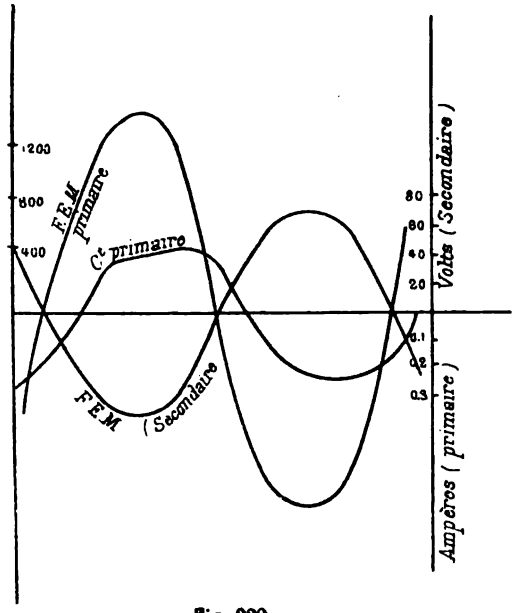


Fig. 220

Digitized by Google

les parties qui avaient été relevées, de manière à fermer les circuits magnétiques. Ordinairement, on ne place pas de papier entre les tôles, l'oxyde servant d'isolant.

L'ensemble est ensuite serré énergiquement au moyen de boulons, reliant deux cadres en fonte, placés à chacune des extrémités de l'empilement des feuilles de tôle.

MM. Ryan et Meritt (1) ont tracé, par la méthode des contacts instantanés (chapitre VIII) des courbes relatives au fonctionnement à diverses charges d'un transformateur Westinghouse.

Ce transformateur avait les dimensions suivantes (fig. 210, p. 225) en c. m.

$$a = 11{,}5 \qquad b = 18 \qquad c = 19 \qquad d = 7{,}5 \qquad e = 3$$

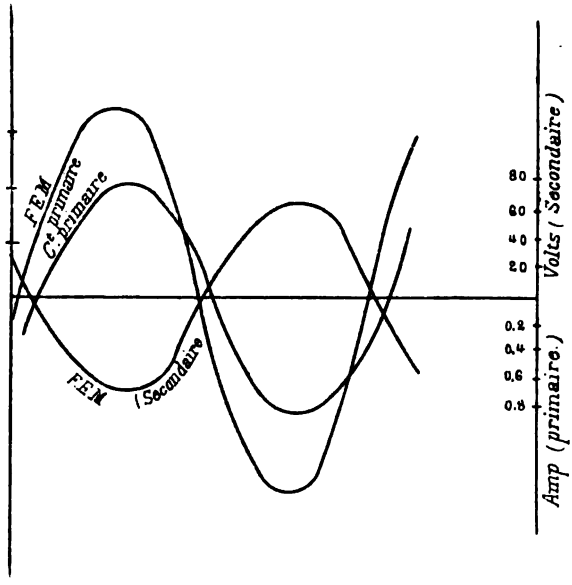


Fig. 221

Le volume du fer était de 2.050 c. m³, la section principale du circuit magnétique de 63,3 c. m², et la longueur moyenne de 30,8 c. m.

Le nombre de spires du circuit primaire était de 675, celui du circuit secondaire 35; la résistance du circuit primaire était de 21,8 ohms, celle du circuit secondaire de 0,04 ohm.

Les courbes des figures 219, 220 et 221 donnent les indications sur le

1. *La Lumière électrique* du 1er février 1890.

Digitized by Google

fonctionnement du transformateur : 1° à vide ; 2° à la charge d'une lampe ; 3° à la charge de dix lampes à incandescence de seize bougies.

Le rendement, les diverses pertes, la tension dans le secondaire, etc., sont indiqués dans le tableau suivant; la tension primaire étant de 1.020 v.

CHARGE	Volts au secondaire	WATTS		Rendement	PERTES			
		primaire	secondaire		hystérésis	Circuits primaire	Circuits second.	totales
Circuit ouvert . .	52,3	96,1	0	0	95,7	0,4	0	96,1
Une lampe . . .	52,3	159,1	64,3	64,3	93,9	0,9	0,9	94,8
Cinq lampes. . .	50,1	388,6	300,9	77,5	83,1	3,3	1,3	87,4
Dix lampes . . .	47,1	607,9	525,0	86,6	69,7	8,7	4,5	82,9

Le retard de la f. e. m. secondaire, par rapport à la f. e. m. primaire, visible sur la figure 221 (charge de dix lampes) provient des dérivations magnétiques.

Les pertes par hystérésis et courants de Foucault diminuent rapidement avec la charge. Nous avons donné l'explication de ce fait page 198.

d.) Transformateurs à circuits magnétiques multiples.

Transformateur Schuckert.

Les transformateurs Schuckert sont constitués par un anneau formé d'une tôle mince enroulée en spirale, avec interposition de papier isolant. A la partie supérieure, sont ménagées quatre, six ou huit rainures radiales, laissant par conséquent entre elles des projections en forme de coins. De deux en deux, ces dents portent un enroulement primaire et un enroulement secondaire superposés (fig. 222).

La face supérieure des dents est soigneusement tournée et on y adapte, au moyen de boulons, un anneau plat, constitué de la même manière que le premier.

La Commission de l'Exposition de Francfort a soumis à des essais un transformateur Schuckert de 10 k. w. 2.500 v, primaires, 139 v. secondaires, construit pour la fréquence de 50.

Digitized by Google

Le transformateur était formé de quatre divisions, chacune avait 435 spires primaires et 24 spires secondaires, les poids de cuivre

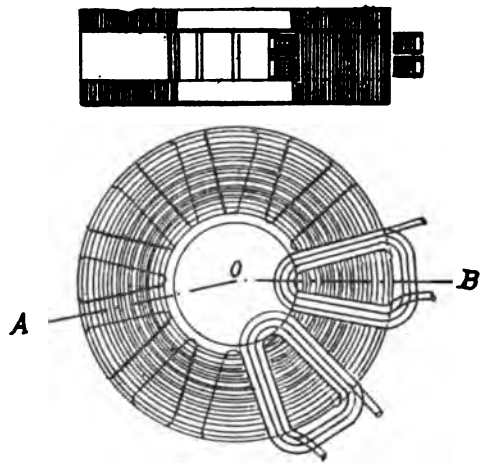


Fig. 222

étaient respectivement de 6,2 et de 7,9 kilogrammes. L'anneau portant les dents pesait 120 kilogrammes, le couvercle 77 kilogrammes.

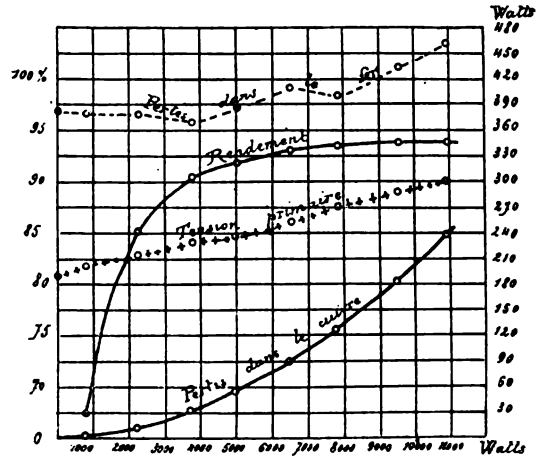


Fig. 223.

La commission ne put faire les essais dans les conditions normales indiquées ci-dessus, elle dut adopter une fréquence de 100 et comme on ne pouvait atteindre la tension de 2.500 volts (à cette tension, le transformateur devait avoir deux enroulements primaires en série,

Digitized by Google

et les enroulements secondaires tous en série), on plaça tous les enroulements primaires en parallèle à la tension de 1.600 v., soit environ de 30 % plus forte que la tension normale $\left(\frac{2.500}{2}\right)$ et on laissa les enroulements secondaires en série.

Les courbes de la figure 223 donnent les résultats des essais. La courbe de la tension primaire indique la tension qu'il fallait avoir aux bornes du primaire pour que la tension aux bornes du secondaire reste constante (176 v. environ).

La Commission a examiné l'influence de l'augmentation de la tension primaire et de la fréquence sur le rendement du transformateur.

Comme pour la même charge, les intensités du courant sont moindres, les pertes dans le cuivre diminuent.

Pour la charge de 10 k. w., les intensités des courants auraient été 1,30 fois plus fortes; la perte dans le cuivre mesurée ayant été de 236 w. dans les conditions normales, elle aurait dû être de :

$$236 \times \overline{1,30}^2 = 399 \text{ w}$$

Ainsi qu'il ressort des résultats des expériences (page 219), les pertes dans le fer (qui étaient de 397 w. à 10 k. w.), auraient été à la tension normale, $1,30^{1,65}$ fois plus faibles :

$$\frac{397}{1,30^{1,65}} = 258 \text{ w}$$

La perte totale, au lieu d'être 236 + 397 = 633 w., aurait été de 399 + 258 = 657 w.. soit de 24 w. plus forte. Mais, en considérant qu'à 50 périodes, la perte dans le fer (voir page 198) aurait été plus élevée qu'à 100 périodes, on est en droit de prétendre que les rendements dans les conditions normales auraient été, à très peu de chose près, les mêmes que ceux trouvés dans les essais dans le cas de charges élevées.

A faible charge, par contre, comme les pertes dans le cuivre sont peu importantes, le rendement dans les conditions normales de fonctionnement serait un peu supérieur à celui trouvé.

Pour les mêmes raisons que celles exposées page 229, la variation de f. e. m.primaire, pour maintenir la tension secondaire constante, aurait été moins forte dans les conditions normales du fonctionnement.

Digitized by Google

Le tableau suivant donne la valeur de cos ψ' ou du facteur de puissance, aux diverses charges.

1re SÉRIE D'EXPÉRIENCES		2e SÉRIE D'EXPÉRIENCES	
Charge en watts	cos ψ'	Charge en watts	cos ψ'
10871	0,993	10733	0,992
9514	0,993	9142	0,993
7807	0,984	7956	0.995
6480	0,983	6601	0,998
4991	0,989	5124	0,982
3768	0,985	3628	0,965
2251	0,946	2206	0,935
796	0,806	785	0,784

§ 5. — TRANSFORMATEURS POUR COURANTS POLYPHASÉS.

On peut, pour chaque phase du courant, employer un transformateur ordinaire, mais il vaut mieux, au point de vue de l'économie du prix d'achat, constituer un seul transformateur pour l'ensemble des circuits.

La figure 224 donne le schéma d'un transformateur pour courant biphasé ; les trois branches ABC sont reliées haut et bas par des culasses en fer feuilleté ayant au moins la même section qu'eux.

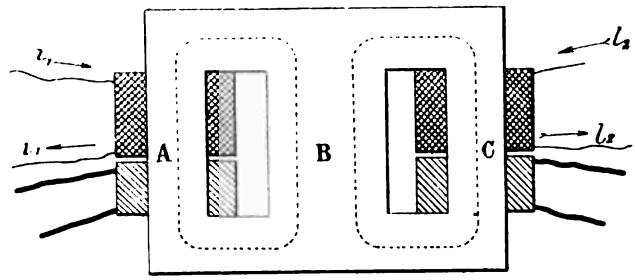


Fig. 224.

Les branches A et B sont entourées des enroulements primaire et secondaire de chaque phase. La branche B n'a aucun enroulement, les flux magnétiques se fermant comme l'indiquent les lignes pointillées.

Digitized by Google

On donne ordinairement à la branche B une section double de celles des branches A et C, mais on pourrait lui donner une section moindre, tout en y ayant la même induction, en effet, le flux dans la branche A peut être représenté par $\Phi_0 \sin kt$ et dans la branche C par $\Phi_0 \sin \left(kt + \frac{\pi}{2}\right)$, le flux dans la branche B sera :

$$\Phi_0 \sin kt + \Phi_0 \sin \left(kt + \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{2}\, \Phi_0 \sin \left(kt + \frac{\pi}{4}\right)$$

Si S est la section des branches A et C, on pourrait donner à la branche B la section $\sqrt{2}\,S = 1{,}41\ S$, au lieu de 2 S. Il vaut mieux prendre comme section 2S et constituer en somme le transformateur de deux transformateurs à circuit magnétique simple accolés, car dans ce cas, les flux ne réagissent pas l'un sur l'autre pour faire varier les décalages. L'étude est la même que pour le cas du courant biphasé avec fil de retour unique (voir 1er volume, page 161).

Dans le cas de courants triphasés, le schéma du transformateur est indiqué figure 225. Les trois noyaux ABC sont entourés chacun par un enroulement primaire et secondaire.

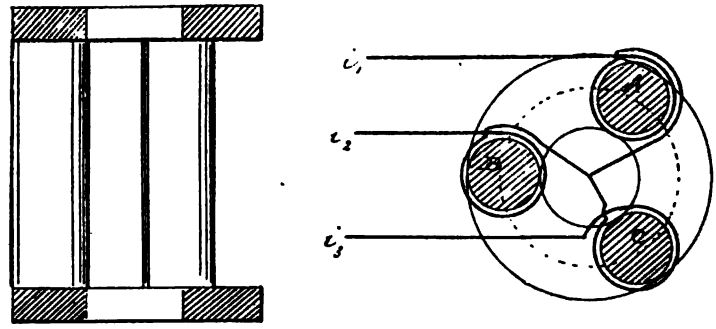


Fig. 225.

Les flux magnétiques dans les noyaux de section S ont comme valeur maximum Φ_0 :

On est tout à fait dans le cas du montage à double étoile (1er volume, page 182, figure 49), les intensités dans les noyaux étant $i_{1,2}$, $i_{2,3}$, $i_{3,1}$, et dans les anneaux haut et bas i_1, i_2, i_3, i'_1, i'_2, i'_3. La valeur maximum du flux dans les anneaux est donc 1,73 plus faible que dans noyaux. Si donc on veut avoir la même induction partout, il suffira si S est la section des noyaux, de donner anx anneaux une section $\frac{S}{1{,}73} = 0{,}577\ S$.

Digitized by Google

On peut également constituer le transformateur triphasé par trois noyaux dont les axes sont situés dans un même plan, mais dans ce cas, les culasses doivent avoir la même section que les noyaux pour que l'induction maximum y soit la même.

Le calcul d'un transformateur polyphasé est tout à fait analogue à celui d'un transformateur ordinaire et les divers phénomènes sont identiques à ceux étudiés.

Transformateur Schuckert à courant biphasé.

Le transformateur est tout à fait analogue à celui décrit page 235, (fig. 222). Les dents sont entourées de deux en deux par les enroulements primaire et secondaire. Toutes les bobines situées du même côté d'un des diamètres de l'anneau sont reliées en série et constituent l'une des phases; il en est de même pour les bobines secondaires.

Transformateurs triphasés Labour (fig. 226).

Les circuits magétiques sont constitués de la même manière que ceux des transformateurs ordinaires (p. 220).

Les bobines montées sur les carcasses en bois sont enfilées sur les noyaux et les circuits magnétiques sont complétés au moyen de deux cylindres en fer feuilleté enfoncés à force.

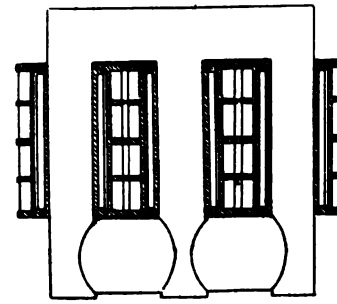


Fig. 226.

Transformateurs triphasés pour le transport d'énergie de Lauffen-Francfort à l'Exposition de 1891.

Ces transformateurs construits, les uns par la Société des établissements d'Oerlikon, les autres par l'Allgemeine Elektricitæts Gesellschaft, sont du même type que celui indiqué schématiquement sur la figure 225.

Les noyaux étaient en fer feuilleté et les anneaux supérieur et inférieur constitués par un ruban de tôle, enroulé en spirale, avec interposition de papier isolant.

Les deux enroulements primaire et secondaire étaient concentriques (fig. 227), la bobine à basse tension en gros fil était enroulée sur le

Digitized by Google

Numéro de l'essai	Nombre de tours de la dynamo	T_0 chevaux	Rendement de la dynamo	T_1 chevaux	Perte dans les câbles de liaison en chevaux	T_1' chevaux	I_1 ampères	E_1 volts	E_2 volts	T_2 chevaux	Σ (P) chevaux	$R_1 R_2 = \frac{T_2}{T_1'}$	$R = \sqrt{R_1 R_2}$
I[a]	149,5	151,6	0,917	139,02	2,36	136,66	660	58,0	55,6	125,76	10,90	0,9202	0,959
I[b]	149,5	151,8	0,917	139,20	2,36	136,84	662	58,0	55,7	125,80	11,04	0,9193	0,959
I[c]	150,0	151,7	0,917	139,11	2,36	136,75	662	58,1	55,8	126,42	10,33	0,9245	0,962
I[d]	150,1	151,7	0,917	139,11	2,36	136,75	662	58,2	55,9	126,75	10,00	0,9269	0,963
										126,18	10,57		0,961
II[a]	150,2	117,7	0,894	105,22	1,57	103,65	540	55,2	53,2	96,13	7,52	0,9274	0,963
II[b]	149,7	117,7	0,894	105,22	1,57	103,65	540	55,2	53,0	96,16	7,49	0,9277	0,963
II[c]	150,1	119,2	0,895	106,68	1,57	105,11	538	54,8	52,7	96,01	9,10	0,9134	0,956
II[d]	149,8	119,1	0,895	106,59	1,57	105,02	540	54,8	52,8	95,87	9,15	0,9129	0,955
										96,04	8,32		0,959
III[a]	150,0	86,6	0,856	74,13	0,77	73,36	377	53,5	52,7	66,79	6,57	0,9104	0,954
III[b]	150,1	86,6	0,856	74,13	0,77	73,36	377	53,5	52,7	66,95	6,41	0,9126	0,955
III[c]	150,1	86,6	0,856	74,13	0,77	73,36	377	53,6	52,8	66,94	6,42	0,9125	0,955
III[d]	149,9	86,6	0,856	74,13	0,77	73,36	377	53,6	52,8	66,99	6,37	0,9132	0,956
										66,92	6,44		0,955
IV[a]	149,9			(49,04)	0,32	48,72	244	55,1	54,7	43,59	5,13	0,8947	0,946
IV[b]	149,6			(48,98)	0,32	48,66	244	54,9	54,6	43,60	5,06	0,8960	0,947
IV[c]	150,0			(49,02)	0,32	48,70	243	55,0	54,7	43,66	5,04	0,8965	0,947
IV[d]	150,0			(49,00)	0,32	48,68	244	55,2	54,7	43,65	5,03	0,8967	0,947
										43,62	5,06		0,947

Digitized by Google

noyau, la bobine à haute tension sectionnée était superposée avec interposition d'un manchon en porcelaine. Les transformateurs bien séchés étaient placés dans une enveloppe en tôle remplie d'huile.

Fig. 227.

Détermination du rendement.

On avait d'abord pensé à mesurer le rendement de chaque transformateur au moyen de six wattmètres. Mais, après discussion, les membres de la commission tombèrent d'accord pour exécuter les essais de la manière suivante :

Comme on disposait, aussi bien à Lauffen qu'à Francfort, de deux transformateurs de la Société générale d'électricité de 100 k. w. et d'un transformateur d'Oerlikon de 150 k. w., on commença par mesurer le rendement des transformateurs de 100 k. w. et on se servit de l'un d'eux pour déterminer le rendement du transformateur de 150 k. w.

a) *Rendement des transformateurs de la Société générale d'électricité.*

On relia les circuits à haute tension des deux transformateurs entre eux. Les circuits à basse tension de l'un étant reliés à l'alternateur, on intercala dans les circuits à basse tension de l'autre les

Digitized by Google

résistances formées de lampes à incandescence et les trois wattmètres.

Le travail T_1, fourni au premier transformateur était calculé au moyen du travail T_0 fourni à la dynamo (déterminé comme il est indiqué page 77) et du rendement connu de la dynamo, on obtenait ainsi le travail T_1 et en en déduisant le travail perdu dans la canalisation entre la dynamo et les bornes du transformateur, on obtenait T_1', travail fourni aux transformateurs; T_3, travail fourni par le deuxième transformateur était obtenu au moyen des wattmètres.

Le rendement $R_1' R_2'$ de l'ensemble des deux transformateurs était $\frac{T_3}{T_1'}$, on admettait que $R' = R' = R'$, c'est-à-dire que les deux transformateurs avaient le même rendement.

Le tableau de la page 240 donne les résultats de quatre séries d'essais, I_1 représente la valeur moyenne de l'intensité des courants dans les trois circuits de la dynamo, E_1 est la tension moyenne entre un circuit de la dynamo et le fil neutre à la terre, et E_3 entre un circuit du deuxième transformateur et le fil neutre.

Les premières colonnes des quatre derniers essais ne sont pas remplies, car on n'avait pas d'expériences au frein répondant aux conditions de fonctionnement de la turbine.

Le tableau suivant résume les renseignements du premier tableau et donne la perte P_2 dans le deuxième transformateur, calculée d'après les rendements.

TRAVAIL FOURNI au 1er transformateur T_1'	TRAVAIL MESURÉ aux bornes du 2e transformateur T_3	RENDEMENT R'	P_2
136,75	126,18	0,961	5,12
104,36	96,04	0,959	4,11
73,36	66,92	0,955	3,15
48,69	43,62	0,947	2,49

Afin de pouvoir employer les résultats au calcul du rendement du

Digitized by Google

transformateur d'Oerlikon, il est nécessaire de considérer les diverses pertes dans le transformateur, on a :

$$P_t = P_f + P_c$$

P_f pertes dans le fer (hystérésis et courants de Foucault) sont pour une fréquence donnée à peu près constantes. P_c perte dans le cuivre des deux enroulements varie avec la charge.

La commission a admis, après discussion, que l'on pouvait admettre la relation :

$$P_t = 2{,}26 + 0{,}000185\ T_3^2$$

Le tableau suivant, calculé en employant cette relation, donne les rendements aux diverses charges :

T_3 Travail recueilli	PERTES	RENDEMENT	T_3 Travail recueilli	PERTES	RENDEMENT
40	2,56	0,940	100	4,11	0,960
50	2,72	0,948	110	4,50	0,961
60	2,92	0,954	120	4,92	0,961
70	3,16	0,957	130	5,39	0,960
80	3,44	0,959	140	5,89	0,960
90	3,76	0,960	150	6,43	0,959

Le travail normal est de 140 chevaux environ (100 k. w.), le rendement est alors de 0,960. Le rendement maximum pour lequel les pertes dans le fer et dans le cuivre sont égales est de 0,961.

b) *Détermination du rendement du transformateur d'Oerlikon.*

On remplaça le transformateur n° 1 de l'expérience précédente par le transformateur d'Oerlikon et on procéda aux mêmes essais (Voir le tableau de la page 245).

R^t est le rendement total, R_a^t celui du transformateur de la Société générale. Le rendement du transformateur d'Oerlikon R_o^t, a été obtenu par la relation :

$$R_o^t = \frac{R^t}{R_a^t}$$

Digitized by Google

La perte totale dans le transformateur d'Oerlikon a pu être exprimée par la relation :

$$P_t = 3{,}60 + 0{,}0001075\ T_2^2$$

T_2 étant le travail en chevaux fourni par le transformateur.

Le tableau suivant calculé d'après cette formule, donne les rendements du transformateur d'Oerlikon aux diverses charges :

T_2	RENDEMENT	T_2	RENDEMENT	T_2	RENDEMENT
50	0,913	110	0,949	170	0,957
60	0,923	120	0,951	180	0,957
70	0,932	130	0,953	190	0,957
80	0,938	140	0,954	200	0,957
90	0,943	150	0,955	210	0,957
100	0,946	160	0,956	220	0,957

Le transformateur d'Oerlikon, installé à Francfort, avait les mêmes dimensions que celui de Lauffen, mais l'enroulement de gros fils comportait 24 spires de section s, tandis que celui de Lauffen en avait 18, dont la section était $\frac{24\,s}{18}$. La résistance de l'enroulement du transformateur de Francfort était donc $\left(\frac{4}{3}\right)^2$ fois plus forte que celle du transformateur de Lauffen.

Comme d'autre part, dans les deux transformateurs, l'induction magnétique était différente, la partie fixe des pertes (que l'on suppose être due à l'hystérésis seule) était également différente. A la suite des calculs faits par la commission, on a admis que les pertes pouvaient, dans le transformateur de Francfort, être exprimées par la relation :

$$P = 3{,}42 + 0{,}0001271\ T_3^2$$

T_3 étant le travail en chevaux mesuré à Francfort.

Digitized by Google

Numéro de l'essai	Nombre de tours de la dynamo	T_o chevaux	Rendement de la dynamo	T_1 chevaux	I_1 ampères	E_1 volts	E_3 volts	T_3 chevaux	Pertes dans les transformateurs chevaux	Perte dans le transformateur de la Société générale chevaux	Perte dans le transformateur d'Oerlikon chevaux	$R' = R_a R \frac{'_o}{T_3} = \frac{T_3}{T_1}$	R'_a	R'_o
I^a	150,2	153,0	0,917	140,30	654	57,4	54,5	128,73	11,57	5,33	6,24	0,9175	0,960	0,956
I^b	150,2	153,2	0,917	140,48	654	57,4	54,1	128,77	11,71	5,33	6,38	0,9166	0,960	0,955
I^c	149,5	153,2	0,917	140,48	655	57,4	54,6	129,00	11,48	5,63	6,15	0,9183	0,960	0,957
								128,83			6,26			0,956
II^a	152,9	118,4	0,895	105,97	475	56,5	53,9	95,96	10,01	3,95	6,06	0,9056	0,960	0,943
II^b	149,9	118,3	0,895	105,88	482	56,7	54,3	95,86	10,02	3,95	6,07	0,9054	0,960	0,943
II^c	150,3	118,0	0,894	105,49	483	56,7	54,2	95,34	10,15	3,95	6,20	0,9038	0,960	0,941
								95,72			6,11			0,942
III^a	149,8	85,9	0,855	73,44	342	55,7	53,9	65,18	8,26	3,04	5,22	0,8872	0,956	0,928
III^b	150,1	86,2	0,856	73,78	340	56,1	54,1	65,38	8,40	3,04	5,36	0,8861	0,956	0,927
								65,28			5,29			0,928
IV^a	149,8			48,79	234	53,4	51,5	41,86	6,95	2,58	4,37	0,8583	0,942	0,911
IV^b	150,0			48,79	235	53,5	51,6	41,81	6,98	2,58	4,40	0,8569	0,942	0,910
								41,83			4,39			0,910

Digitized by Google

§ 6. — ESSAIS D'UN TRANSFORMATEUR.

On doit d'abord vérifier si les divers circuits sont capables de supporter la tension voulue.

Pour celà, les mesures ordinaires de la résistance d'isolement sont peu concluantes.

Il faut soumettre le transformateur à une différence de potentiel double ou triple de la normale, appliquée au moins pendant une heure : 1° entre le primaire et le secondaire ; 2° entre le secondaire et le noyau.

On doit également examiner le transformateur au point de vue de l'élévation de température, à pleine charge et à vide. On fait pour celà fonctionner le transformateur à pleine charge et à vide jusqu'à ce que la température de thermomètres, placés en divers points, reste stationnaire, la température ne doit pas dépasser 60°.

Si à vide, la température est élevée, le fait provient, soit de ce que le courant de magnétisation est trop intense, soit de ce que le circuit magnétique est mal conditionné.

On doit aussi examiner si la variation de la tension secondaire, suivant la charge, ne dépasse pas les limites admissibles pour le fonctionnement des appareils, dans aucun cas la différence de tension entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement à pleine charge, ne doit dépasser 5 %.

Les essais doivent ensuite porter sur le rendement aux diverses charges, ainsi que sur la perte de puissance à vide.

Les rendements peuvent être facilement déduits des courbes obtenues par la méthode des contacts instantanés que nous étudierons au chapitre VIII.

On peut également employer la méthode *calorimétrique*. On place le transformateur dans un calorimètre et on le fait fonctionner à la charge voulue, jusqu'à ce que la température de l'eau sortant de l'appareil soit stationnaire. Si W_2 exprimé en watts est la puissance dans le secondaire, p le poids de l'eau en grammes passant par seconde dans le calorimètre, t la température de l'eau à l'entrée et t' sa température à la sortie, le rendement est exprimé par la relation :

$$\eta = \frac{W_2}{4{,}2\,p\,(t' - t) + W_2}$$

Digitized by Google

Dans les essais, la résistance du secondaire est toujours constituée de manière à être non inductive, soit au moyen de lampes à incandescence bien étalonnées, soit au moyen de deux conducteurs tendus de manière à être parcourus en sens inverse par le courant, soit au moyen d'une bobine enroulée d'un fil bouclé, ou comportant un nombre pair de couches, alternativement enroulées dans un sens et dans l'autre. La puissance dans le secondaire peut donc être facilement obtenue, soit à l'aide d'un électrodynamomètre et d'un voltmètre, soit à l'aide d'un wattmètre.

La puissance dans le circuit primaire est plus difficile à déterminer par suite du décalage entre la f. e. m. et le courant, nous étudierons au chapitre VIII les méthodes à employer.

§ 7. — CALCUL D'UN TRANSFORMATEUR.

On a comme données :

1° E_1^c la f. e. m. efficace en volts aux bornes du primaire;

2° La f. e. m. efficace dans le secondaire E^e en volts ;

3° La puissance dans le secondaire W en watts ;

4° La charge $\frac{W}{m}$ pour laquelle la somme des pertes dans le cuivre et dans le fer doit être minimum;

5° La fréquence.

On détermine d'abord les sections des spires du primaire et du secondaire en se donnant la densité maximum du courant.

La densité varie ordinairement de 0,50 à deux ampères par m. m², (plus la densité est faible, meilleur est le rendement ainsi que l'autorégulation).

Comme à pleine charge le décalage est pratiquement nul, on aura :

$$I_1^c = \frac{W}{\eta E_1^c}$$

η étant le rendement à pleine charge, qui peut varier de 0,90 à 0,97 suivant la puissance du transformateur.

On aura aussi :

$$I_2^c = \frac{W}{E}$$

Digitized by Google

Si i_1 est la densité admise pour le courant, les sections en mm² des conducteurs seront :

$$s_1 = \frac{I_1^c}{i_1} \qquad s_2 = \frac{I_2^c}{i_1}$$

On déterminera ainsi les sections et on pourra choisir, soit les fils, soit les barres de cuivre dont les sections se rapprochent le plus des chiffres trouvés. Dans le cas où la section du secondaire, ainsi calculée, serait trop forte, il faudrait constituer l'enroulement, au moyen de plusieurs bobines mises en parallèle, afin d'éviter les courants de Foucault dans le cuivre.

La résistance par c. m. de longueur de fil pourra être déterminée par les relations suivantes :

$$\rho = \frac{0{,}00025}{d^2} = \frac{0{,}0002}{s}$$

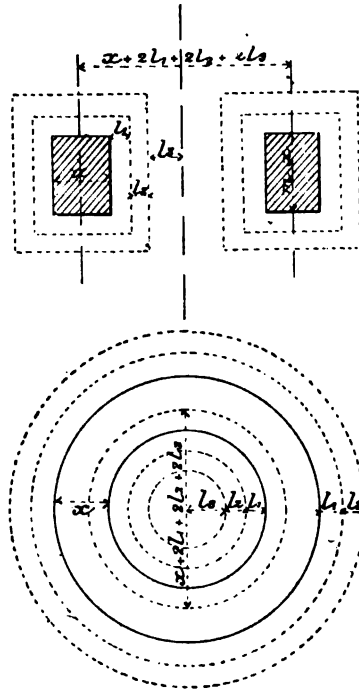


Fig. 228.

d et s étant exprimés en m.m. et ρ en ohms. Ces chiffres se rapportent à du cuivre pur à la température de 60°.

On tracera ensuite un schéma du transformateur, d'après le type adopté en rapportant toutes les dimensions à une seule inconnue.

Par exemple, pour un transformateur du type Ganz (fig. 228), on déterminera par comparaison avec un transformateur existant, la distance l_1 de la spire moyenne du secondaire au noyau, la distance l_2 de la spire moyenne du primaire à celle du secondaire et la distance l_3 de la spire moyenne du primaire à l'axe. On a intérêt à diminuer autant que possible l_3, car le volume du noyau en dépend.

Le volume total du noyau sera :

$$V = \pi\,(x + 2\,l_1 + 2\,l_2 + 2\,l_3)\,m\,x^2$$

Digitized by Google

Le volume V_g du fer, sera :

$$V_g = \delta V$$

δ varie avec l'épaisseur de la tôle et du papier isolant, ordinairement on prend $\delta = 0{,}85$.

Pour un transformateur du type Labour, (fig. 229) on prendra comme précédemment les longueurs l_1, l_2, l_3 en comparant avec un transformateur existant.

Le volume total des noyaux dans lesquels on a l'induction B, sera :

$$V_1 = 2\, m\, n\, x^3$$

Le volume des culasses dans lesquelles l'induction est $\frac{B}{p}$, sera :

$$V_2 = 2\,(x + l_1 + l_2 + l_3)\, m\, p\, x^2$$

Il faudra naturellement multiplier V_1 et V_2 par δ pour avoir le volume du fer.

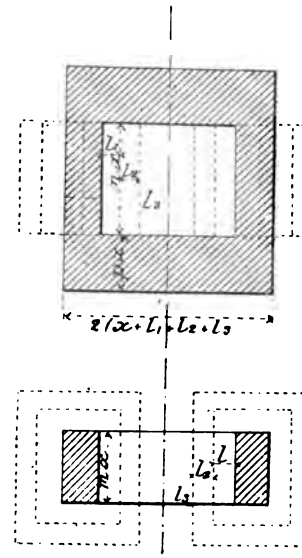


Fig. 229.

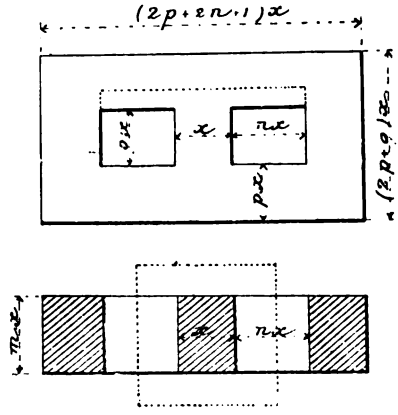


Fig. 230.

Pour un transformateur du type Westinghouse (fig. 230), on ramènera toutes les dimensions à une inconnue x, et on aura :

Volume du fer du noyau (induction B).

$$V_1 = \delta\, m\, o\, x^3$$

Digitized by Google

Volume total du reste du fer des circuits magnétiques (induction $\frac{B}{2p}$.

$$V_2 = 2\,\delta\,p\,(2p + 2n + o + 1)\,mx^2$$

L'induction maximum B étant choisie suivant la fréquence, d'après les données du tableau de la page 96, on calculera la perte en watts par c. m³ de fer, d'après les données des tableaux (page 107) pour les valeurs B, $\frac{B}{p}$ ou $\frac{B}{2p}$, de l'induction maximum.

La perte totale par hystérésis et courants de Foucault, dans le transformateur, sera donc exprimée par une relation de la forme :

$$p_1 = a\,x^3 + b\,x^2$$

La longueur moyenne d'une spire dans chaque cas est déterminée en fonction de x.

Pour le transformateur en anneau, on aura (fig. 229) :

$$L_1 = 2\,(m + 1)\,x + 8\,l_1$$

$$L_2 = 2\,(m + 1)\,x + 8\,(l_1 + l_2)$$

Pour le transformateur du type Labour (fig. 229), on aura les mêmes relations :

Pour les transformateurs du type Westinghouse (fig. 230), les deux bobines étant placées l'une à côté de l'autre et étant rectangulaires, on aura :

$$L_1 = L_2 = 2\,(m + 2n + 1)\,x$$

Si les bobines sont arrondies aux extrémités on aura :

$$L_1 = L_2 = \{2\,m + \pi\,(1 + n)\}\,x$$

On aura donc, en général, comme longueur moyenne d'une spire :

$$L_1 = a'\,x + b'$$

$$L_2 = a''\,x + b''$$

La longueur totale du fil du circuit primaire sera $n_1\,L_1$ celle du fil du circuit secondaire $n_2\,L_2$.

Digitized by Google

Si ρ_1 est la résistance par c. m. du fil primaire et ρ_2 celle du fil secondaire (page 248), on aura :

$$r_1' = n_1 L_1 \rho_1 = n_1 (a' x + b') \rho_1$$
$$r_2' = n_2 L_2 \rho_2 = n_2 (a'' x + b'') \rho_2$$

Mais on a :

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{E_1^e}{E_2^e} = \alpha$$

α étant le rapport de transformation.

Le transformateur doit être calculé pour que la somme des pertes, à la puissance $\frac{W}{m}$ soit minimum; on aura :

$$I_1^{e'} = \frac{W}{\eta' m E_1^e} \qquad I_2^{e'} = \frac{W}{m E_2^e}$$

η' étant un coefficient tenant compte à la fois du rendement et du décalage, on prendra pour η' une valeur plus faible que pour η.

Si m est grand, η doit être faible, car le décalage augmente à mesure que la charge diminue.

On pourra déterminer approximativement η' au moyen des courbes de rendement et des valeurs du décalage d'un transformateur analogue.

Les pertes, par suite de la résistance des conducteurs, seront :

$$p_1' = n_1 (a' x + b') \rho_1 (I_1^{e'})^2$$
$$p_2' = \frac{n_1}{\alpha} (a'' x + b'') \rho_2 (I_2^{e'})^2$$

La somme des pertes dans le cuivre sera donc exprimée par une relation de la forme :

$$p_2 = n_1 (a''' x + b''')$$

D'autre part, la formule générale des transformateurs est :

$$\Phi_0 = B S = \frac{\sqrt{2} E_1^e 10^8}{2 \pi F n_1}$$

On a (fig. 228, 229 et 230) :

$$S = \delta m x^2$$

Digitized by Google

On aura donc :

$$n_1 = \frac{\sqrt{2}\ E_1^e\ 10^8}{2\pi\ F\ B\ \delta m x^2} = \frac{f}{x^2}$$

$$p_1' = \frac{f}{x^2}(a'\ x + b')\ \rho_1\ (I_1^e)^2$$

$$p_2' = \frac{f}{\alpha\ x^2}(a''\ x + b'')\ \rho_2 (I_1^e)^2$$

La perte totale de puissance dans le fer et dans le cuivre pourra donc être exprimée par une relation de la forme :

$$a_1 x^3 + b_1 x^2 + \frac{c_1}{x} + \frac{d_1}{x^2}$$

qui est susceptible d'un maximum, pour une valeur de x, donnée par l'équation :

$$3\ a_1 x^2 + 2\ b_1 x - c_1 x^{-2} - 2\ d_1 x^{-3} = 0$$
$$3\ a_1 x^5 + 2\ b_1 x^4 - c_1 x - 2\ d_1 = 0$$

équation que l'on pourra résoudre, soit par approximations successives, soit en construisant la courbe.

On pourra alors dessiner complétement le transformateur et voir si l'on a la place nécessaire pour loger les spires et la matière isolante.

Si l'on n'a pas la place nécessaire, ou si au contraire on en a en excès, on recommencera les calculs en partant des nouvelles données.

On pourra ensuite examiner s'il n'y aurait pas intérêt à choisir une induction maximum différente de celle adoptée. On admettra par exemple une induction maximum un peu plus forte, on refera les calculs et on verra si la somme des pertes dans le cuivre et dans le fer est plus faible ou plus forte. Si elle est plus forte, on choisira une induction plus faible que celle admise en premier lieu, etc... On arrivera ainsi à avoir le minimum de perte pour la charge donnée.

On pourra ensuite, au moyen des relations données, calculer le rendement aux diverses charges, l'intensité du courant de magnétisation, les décalages, et vérifier la valeur adoptée pour η'.

Il y aura lieu d'examiner ensuite si la surface de refroidissement

Digitized by Google

est suffisante, pour que la température du fer ou ou du cuivre ne dépasse pas une valeur dangereuse.

On pourra admettre, qu'il faut une surface de refroidissement de 4 c. m.² par watt transformé en chaleur.

§ 8. — LES CONDENSATEURS.

Un condensateur est ordinairement constitué par une série de plaques métalliques, séparées par un isolant liquide ou solide, constituant le diélectrique. Ainsi que l'indique le schéma de la figure 231, les plaques de rang impair sont reliées entre elles, il en est de même des plaques de rang pair.

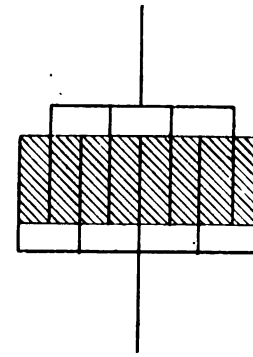


Fig. 231.

Si m est le nombre total des plaques (m est toujours impair), K la capacité spécifique de l'isolant, s la surface utile d'une plaque en c. m², e l'épaisseur du diélectrique en c. m., c la capacité ; on a :

$$c = K\frac{(m-1)\,s}{4\,\pi\,e} \text{ en unités électro-statiques}$$

$$c = K\frac{(m-1)\,s}{4\,\pi\,e}\,\frac{1}{9.10^{20}} \text{ en unités C. G. S.}$$

$$c = K\frac{(m-1)\,s}{4\,\pi\,e}\,\frac{1}{9.10^{11}} \text{ en farads}$$

$$c = K\frac{(m-1)\,s}{4\,\pi\,e}\,\frac{1}{9.10^{5}} = 884\,K\frac{(m-1)\,s}{e.\,10^{10}} \text{ en microfarads}$$

Le diélectrique peut être constitué par un corps solide ou par un liquide.

On peut disposer des condensateurs, soit en surface ou parallèle (fig. 232). Dans ce cas, si c est la capacité d'un des n condensateurs, la capacité de l'ensemble est nc, et chacun d'eux est soumis à la tension totale.

Si on dispose comme l'indique la figure 233, les n condensateurs en

Digitized by Google

tension, la capacité de l'ensemble est $\frac{c}{n}$ et chacun d'eux est soumis à la $n^{ième}$ partie de la tension totale.

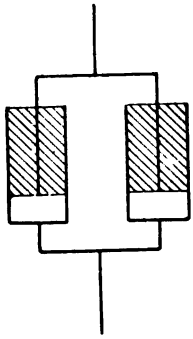


Fig. 232.

On peut aussi en réunir un certain nombre en tension, et placer ces ensembles en parallèle.

Par exemple, avec 4 condensateurs de 1,5 microfarads. On peut obtenir :

1° Une capacité de $4 \times 1{,}50 = 6$ m. f. en les plaçant tous en parallèle ;

2° De $3 \times 1{,}50 = 4{,}50$ m. f. en en plaçant 3 en parallèle ;

3° 3 m. f. en en plaçant 2 en parallèle ;

4° 1,5 m.f. avec un seul, ou bien 2 séries de 3 en parallèle ;

Fig. 233.

5° 0,75 m. f. en en plaçant 2 en série ;

6° 0,50 m.f. en en plaçant 3 en série ;

7° 0,375 m. f. en les plaçant tous les 4 en série.

MM. Hutin et Leblanc ont entrepris des expériences très complètes sur les condensateurs. Dans les unes, pour les tensions moyennes (jusqu'à 2.500 volts) ils employaient comme isolant du papier paraffiné, dans les autres des feuilles minces d'ébonite.

Les premiers avaient été fabriqués par M. Labour, avec du papier de qualité médiocre et de la paraffine commune chauffée à 70° environ.

Leur capacité mesurée par les méthodes ordinaires, donnait un pouvoir inducteur spécifique (K) de 8 environ.

Pour le diélectrique, la décharge résiduelle était à peu près le $\frac{1}{4}$ de la première charge.

Si l'on mesurait leur capacité par la méthode des courants alternatifs (voir chapitre VIII), on trouvait pour K une valeur d'environ $\frac{1}{3}$ plus petite que pour la mesure par la méthode ordinaire.

Ces condensateurs soumis à l'action suivie d'une différence de potentiel alternative comprise entre 1.500 et 2.000 volts, s'échauffaient assez rapidement, la paraffine fondait. Les condensateurs se mettaient à chanter et si l'on n'arrêtait pas l'expérience ils étaient bientôt détruits.

Digitized by Google

MM. Hutin et Leblanc, essayèrent alors du papier et de la paraffine de choix, mais ils n'en retirèrent aucun bénéfice sensible. Ils attribuèrent les phénomènes observés, à la présence dans les cellules, du papier de gouttes d'eau et à des traces d'acide sulfurique restées dans la paraffine lors de sa purificatien. C'est-à-dire que l'on se trouvait en présence d'un diélectrique parfait parsemé de sphères conductrices, ce qui explique le grand pouvoir inducteur spécifique et l'échauffement en service.

En chauffant le papier plusieurs heures, à la température de dissociation de la paraffine, la constitution de ce papier est détruite et les traces d'acide sulfurique sont éliminées. Le papier sorti de la paraffine a changé complètement d'apparence, il a augmenté d'épaisseur et toute trace de fibres a disparu.

En employant ce papier comme diélectrique, le pouvoir inducteur spécifique est réduit à 2,56, la charge résiduelle est devenue insignifiante et le condensateur ne chauffe plus.

Ce mode de préparation du papier est par contre très coûteux, il y a une grande quantité de paraffine qui se décompose et comme les feuilles se collent les unes aux autres, on est obligé de les maintenir chaudes pour les séparer, de sorte que l'opération est difficile et délicate et qu'il en résulte une grande augmentation du prix de la main-d'œuvre.

Les premiers condensateurs qui avaient été considérés comme défectueux, furent soumis à des différences de potentiel de 4.000 volts, et fort malmenés. Au bout d'un certain temps, MM. Hutin et Leblanc, constatèrent que ces condensateurs ne chauffaient plus et que le pouvoir inducteur spécifique du diélectrique était tombé à 2,56, c'est-à-dire que ces condensateurs étaient devenus excellents. Ce que l'action de la chaleur avait pu faire en quelques heures (trois en moyenne) le déplacement électrique qui se produisait au sein de toutes les particules conductrices renfermées dans la masse avait pu le faire à la longue.

On peut donc obtenir d'excellents résultats avec des condensateurs en papier paraffiné et l'on n'a pas à se préoccuper en pratique de la qualité des produits employés, à la condition de les faire passer par une période de formation dans les conditions qui viennent d'être indiquées. Il ne faut les mettre en service qu'en les surveillant attenti-

Digitized by Google

vement et les laissant reposer dès qu'ils s'échauffent sensiblement.

MM. Hutin et Leblanc donnent la règle pratique suivante « *un condensateur fonctionnant sans émettre aucun son, ne court aucun risque. Dès qu'il commence à vibrer, il est en danger.* »

La formation d'un condensateur avec diélectrique en papier paraffiné montre que l'action du courant alternatif sur les isolants, à l'inverse de celle des courants continus est plutôt bienfaisante que nuisible.

MM. Hutin et Leblanc donnent comme il suit l'explication de ce fait.

« Sous l'action d'une différence de potentiel constante, toutes les molécules conductrices renfermées dans un diélectrique s'orientent une fois pour toutes, comme les ions et les cathions d'un électrolyte. Ces molécules tendent à se mouvoir les unes vers les autres, ce qu'elles ne peuvent faire, qu'en se frayant un chemin au travers du diélectrique, en altérant ainsi sa constitution. »

« Sous l'action d'une différence de potentiel alternative, il y a déplacement électrique à l'intérieur de la masse elle-même. Or nous n'avons jamais pu faire passer un courant alternatif, même de densité très faible, dans un liquide, sans amener des traces de dégagement gazeux. N'est-il pas logique d'admettre qu'il se passe la même chose au sein de la molécule conductrice et que les gaz produits ne sont jamais complétement recombinés? Il ne pourrait d'ailleurs en être ainsi, car il n'y a pas de transformation dont le rendement soit égal à 1 ».

« Nous nous expliquons de cette manière que toutes les substances imparfaitement conductrices et qui ne peuvent transmettre l'électricité qu'à la façon des électrolytes, que peut renfermer un diélectrique, seront détruites avec le temps sous l'influence d'une différence de potentiel alternative et avant que la masse du diélectrique ait été sensiblement altérée par l'action de ces molécules les unes sur les autres. »

En employant comme diélectrique de l'ébonite, la capacité mesurée par la méthode ordinaire ou par l'emploi des courants alternatifs est la même, de plus le condensateur ne chauffe pas.

MM. Hutin et Leblanc, collaient les feuilles d'étain sur les plaques d'ébonite, soit avec du chaterton, soit avec de l'arkanson fondu et

Digitized by Google

étendu au pinceau. Les feuilles d'ébonite étaient maintenues sur une plaque chaude, elles se ramollissaient et devenaient très souples, on y appliquait les feuilles d'étain au moyen d'un fer à repasser ordinaire chauffé.

Les plaques d'ébonite les plus minces (0,2 m. m. d'épaisseur) n'ont pu être percées sous une différence de potentiel de 11.000 v., la plus haute que les expérimentateurs aient pu atteindre.

Le celluloïde a donné d'excellents résultats, mais sa trop grande inflammabilité (une étincelle suffisant pour y mettre le feu) empêche que l'on puisse s'en servir industriellement. La variété de celluloïde connue sous le nom de linge américain a donné de meilleurs résultats, mais comme MM. Hutin et Leblanc ont trouvé de l'ébonite à très bon marché (6 fr. 50 le kg. sous une épaisseur de 0,5 m. m. et 12 fr. sous une épaisseur de 0,2 m. m.) ils l'ont préférée.

Lorsqu'on élève beaucoup la tension que l'on fait supporter au diélectrique, on entend un bruit de friture en même temps qu'une odeur d'ozone se répand dans l'atmosphère ; MM, Hutin et Leblanc attribuent ce fait à des décharges latérales dues aux harmoniques supérieures du courant. En effet, ou peut supprimer ce bruit, en augmentant l'espace qui sépare le bord des feuilles de métal, de celui des feuilles du diélectrique. Quand la tension efficaces dépasse 10.000 v., cette distance entre les bords doit être au moins de 5 c. m.

MM. Hutin et Leblanc ont également essayé d'employer du verre comme diélectrique, mais lorsque ce dernier est soumis à des tensions un peu élevées il se brise en fragments très petits et le condensateur est mis hors d'usage.

On peut également employer l'huile comme isolant, mais alors il faut que les plaques métalliques soient à une certaine distance, les unes des autres, afin que l'huile puisse bien pénétrer entre elles. Pour l'huile, la capacité spécifique varie avec la température dans d'assez grandes limites.

MM. *Stanley et Molly*, ont construit des condensateurs à liquide (fig. 234) constitués de la manière suivante : des tôles de fer coniques sont placées dans un récipient les unes au-dessus des autres, et séparées par des morceaux d'isolants; le récipient est ensuite rempli d'une solution de bicarbonate de soude. C'est la capacité de polarisation que l'on utilise, l'appareil étant simplement un bain liquide

Digitized by Google

à électrodes multiples, aussi le condensateur ne peut-il agir que pendant un instant et sa capacité varie. MM. Brown et Boucherot se servent de condensateurs de ce genre pour obtenir le décalage nécessaire lors de la mise en marche des moteurs asynchrones monophasés (voir page 169).

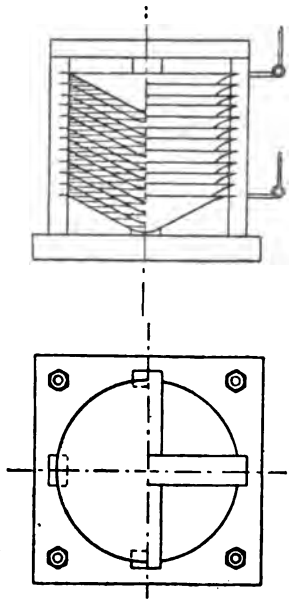


Fig. 234.

La Société américaine, *la Stanley electric C°*, construit des condensateurs pouvant supporter une différence de potentiel de 500 volts, en employant des feuilles d'étain séparées par du papier enduit de cire.

M. Bedell, dans ses expériences sur le transformateur hérisson, s'est servi de condensateurs de cette compagnie.

Le condensateur de 1,5 microfarad était formé de deux parties ayant chacune une capacité de 0,75 m. f., mises en parallèle, chacune de ces parties comportait 65 feuilles d'étain de 0,0018 c. m. d'épaisseur.

Le papier imprégné de cire avait 0,0113 c. m. d'épaisseur. La partie utile des plaques avait une longueur de 26,67 c. m. et une largeur de 20,32 c. m.

Si on détermine la valeur de la capacité spécifique de l'isolant, on a :

$$c = 884\,K\,\frac{(m-1)\,s}{e\,10^{10}}$$

$$K = \frac{c\,e\,10^{10}}{884\,(m-1)\,s} = \frac{0{,}75 \times 0{,}0113 \times 10^{10}}{884 \times 64 \times 26{,}67 \times 20{,}32} = 2{,}76$$

M. Bedell employa dans ses expériences six condensateurs de 1,5 microfarad ; comme la tension était d'environ 1.000 volts et que les condensateurs ne pouvaient guère supporter plus de 500 volts, il fallait qu'il en plaçât toujours au moins deux en tension, de sorte qu'il pouvait obtenir une capacité variant de $\frac{1{,}50}{6} = 0{,}25$ à $\frac{3.1{,}50}{2} = 2{,}25$ microfarads

Digitized by Google

Les condensateurs industriels de *M. Swinburn* sont formés de feuilles d'étain séparées par plusieurs couches de papier mince. L'ensemble est ensuite placé dans un récipient rempli d'huile et l'on chauffe pour éliminer l'humidité. On fait alors le vide dans le récipient pour en extraire l'air et on le ferme hermétiquement.

Il y a toujours dans un condensateur en dehors des pertes par dérivation, mauvais isolement, etc. une perte due au diélectrique lui même, la puissance fournie à l'appareil est toujours supérieure à celle restituée, on a une sorte d'hystérésis analogue à l'hystérésis magnétique. La courbe de la figure 235 a été obtenue par M. Bedell,

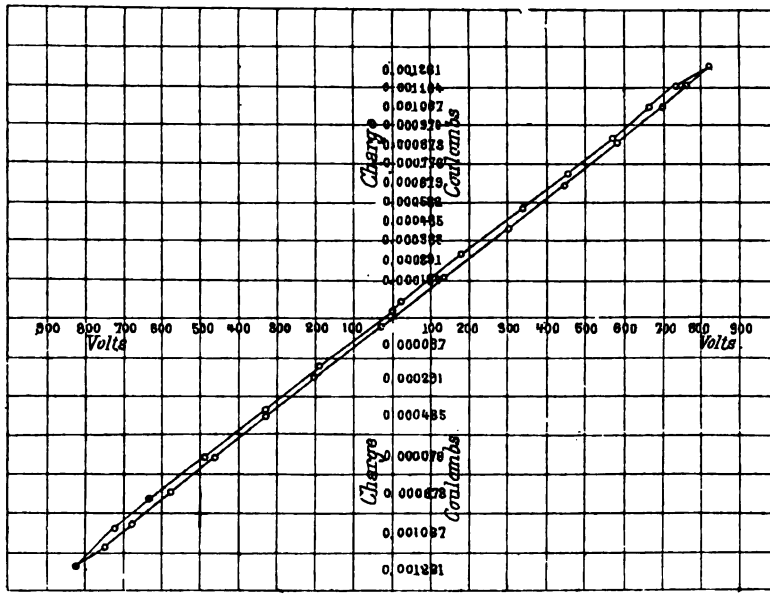


Fig. 235

il a porté en abscisses les valeurs instantanées de la f. e. m. et en ordonnées la charge correspondante, $q = \int i dt$, en la mesurant au planimètre, au moyen de la courbe du courant et en mesurant de même la décharge. On voit que la courbe est analogue à celle de l'hystérésis magnétique (1er volume page 268), la surface est proportionnelle à la perte de travail.

Avec un courant d'une fréquence de 140, la perte était de 4,4 watts, correspondant à un rendement de 96,9 pour cent.

Digitized by Google

Les condensateurs peuvent être, soit de grande capacité et agir par l'intermédiaire de transformateurs dans un circuit à basse tension ou de faible capacité agissant alors dans un circuit à haute tension. Dans les deux cas, l'énergie emmagasinée, c'est-à-dire l'action du condensateur pourra être la même. Il est bien difficile à l'heure actuelle de pouvoir donner la préférence à l'un ou à l'autre système, au point de vue du prix de revient, les condensateurs étant encore très peu employés industriellement.

Digitized by Google

CHAPITRE IV

Foyers lumineux.

§ 1. — LAMPES A INCANDESCENCE.

Le grand avantage de l'emploi des lampes à incandescence dans les locaux est qu'elles ne vicient pas l'atmosphère et qu'elles produisent très peu de chaleur.

Voici d'après une conférence de M. Dicke, à l'Association allemande des techniciens du gaz, le nombre des calories par bougie (1) qu'émettent les diverses sources lumineuses.

Avec gaz d'éclairage (à 5,300 calories)	
Brûleur papillon	42,75 calories
— d'Argand.	37,62 —
— Siemens (grandeur moyenne).	19,67 —
Bec Auer	9,00 —
Avec gaz à l'eau (à 2,620 calories)	
Avec bloc de magnésie (35 normal Kerzen). . .	11,30 —
Bec Auer (50 bougies)	9,00 —
— (120 bougies)	5,73 —
Incandescence électrique	3,00 —

Les lampes à incandescence fonctionnent avec le courant alternatif, au moins aussi bien qu'avec le courant continu et leur durée semble même devoir être plus longue.

Pour que la lumière soit bien fixe, il faut que le courant ait au moins 30 alternances à la seconde.

A un moment donné, on avait construit des lampes spéciales pour courants triphasés, constituées par trois filaments réunis à leur extrémité supérieure (montage en étoile 1er volume, page 158), mais cette

1. La bougie a été comptée comme 0,855 normal Kerze allemande.

Digitized by Google

construction a été abandonnée, car on devait faire aboutir à chaque lampe les trois fils du circuit, ce qui était d'une grande complication.

On a essayé des lampes à filaments multiples disposés de manière à pouvoir être introduits individuellement dans le circuit au moyen d'un commutateur. Quand un filament était détruit ou donnait trop peude lumière, on tournait le commutateur pour en mettre un autre en service. Comme l'ampoule noircit presque toujours à la longue, ce système n'a pas donné les résultats économiques attendus.

Le nombre de watts, nécessaires pour la production de la lumière, par bougie est très variable. Au bout d'un certain temps de fonctionnement l'intensité lumineuse de la lampe baisse et il faut la remplacer.

Plus la lampe absorbe de watts par bougie à l'origine, plus elle dure, c'est-à-dire plus son intensité lumineuse met de temps à atteindre la limite inférieure admissible, au-dessous de laquelle il faut remplacer la lampe.

Au fur et à mesure de la durée, le nombre de watts absorbés par une lampe diminue, mais l'intensité lumineuse baissant dans de plus grandes proportions le nombre de watts par bougie augmente.

Ainsi que le montrent les résultats d'essais suivants, qui nous ont été communiqués par la Société française des lampes homogènes, l'intensité lumineuse de certaines lampes peut augmenter légèrement dans les premières heures de fonctionnement, mais plus tard, elle diminue rapidement.

1° *Essai de 10 lampes de 12 bougies.*

Durée	Intensité lumineuse	Watts totaux	Watts par bougie
0	12,25	37,7	3,08
100 heures	12,50	37,6	3,00
250 »	12,00	37,5	3,12
400 »	11,80	37,3	3,12
600 »	11,60	37,3	3,22
800 »	11,00	37,0	3,36

2° *Essai de 10 lampes de 16 bougies.*

Durée	Intensité lumineuse	Watts totaux	Watts par bougie
0	16,3	52,3	3,21
100 heures	17,0	52,3	3,08
250 »	16,8	52,0	3,10
400 »	16,4	52,0	3,17
600 »	16,0	51,4	3,21
800 »	15,1	51,1	3,38

Digitized by Google

Les essais ont été arrêtés au bout de 800 heures, dans le premier lot de lampes, aucune n'était hors de service, dans le second lot, une seule était hors de service.

On construit actuellement des lampes de 2,5 watts, pouvant durer 400 heures, sans que l'intensité lumineuse baisse de plus de 10 %.

Suivant le prix de revient de l'énergie électrique, l'intensité lumineuse limite admise (plus l'éclairage doit être luxueux plus cette limite est élevée. Dans le cas d'un éclairage un peu luxueux, on doit remplacer toute lampe, dont l'intensité à baissé de plus de 10 %), dont dépend la durée de la lampe, le prix d'achat de la lampe, il est avantageux d'employer un type de lampe donné.

Pour celà il faut chercher le prix moyen de la lampe-heure pour chaque type.

La durée h en heures, d'une lampe d'un type donné, est déterminée par la limite admise pour la diminution d'intensité.

La consommation totale W en watt-heures pendant les h heures de durée peut être déterminée très approximativement au moyen des données des tableaux ou des courbes. Si p est le prix de revient du watt-heure et P le prix d'achat de la lampe, le prix de revient moyen de la lampe-heure sera :

$$\frac{P + p\,W}{h}$$

On fera le même calcul pour les autres types de lampes et on choisira celui donnant la dépense moyenne minimum par heure.

On voit que plus le prix de l'énergie électrique est élevé plus il y a avantage à prendre des lampes à bas wattage.

Une des causes pour lesquelles on doit parfois remplacer les lampes à incandescence avant l'usure admissible du filament est le *noircissement de l'ampoule*. M. Thomas a émis l'opinion que le noircissement des ampoules devait être attribué au mercure employé dans les pompes à vide.

M. Blainville (1) ne partage par cet avis, et il pense que c'est l'oxygène, contenu dans l'air restant dans l'ampoule ou sur le filament, soit dans la vapeur d'eau adhérant au cristal, qui forme avec le carbone

1. *L'Électricien* du 8 avril 1893.

Digitized by Google

incandescent de l'oxyde de carbone, lequel, au contact des parois relativement froides de l'ampoule, se dissocie en carbone qui se dépose et en oxygène qui reforme de nouveau de l'oxyde de carbone et ainsi de suite.

Dans ces conditions, il est évident qu'une lampe noircit d'autant plus vite qu'elle contient une plus grande quantité d'oxygène, c'est-à-dire que le vide y est moins parfait.

Pour la réception, le meilleur procédé est de faire un essai pendant 24 heures de toutes les lampes, mais ce procédé est coûteux.

Le *Journal des usines à gaz* a signalé en 1893, le procédé suivant, d'une application très facile, quoique moins précis que celui donné ci-dessus.

On place le plus grand nombre possible de lampes sur un tableau d'essai muni d'un rhéostat, en ayant soin de ne mettre à la fois que des types égaux en voltage et en intensité lumineuse. On commence à les faire fonctionner à un voltage trop faible, ce qui permet de discerner immédiatement quelques lampes d'un rouge plus sombre que la moyenne. On les note comme douteuses, puis l'on pousse à un voltage plus élevé en notant toujours les lampes les moins brillantes. On achève en les poussant à 6 ou 7 volts au-dessus de la tension efficace normale. Une partie ne résiste pas et ces lampes doivent être refusées.

Quant aux lampes notées comme douteuses, il ne reste qu'à les faire fonctionner pendant 24 heures, et alors il est rare qu'il en reste beaucoup. On doit même se défier de celles qui résistent.

§ 2. — LAMPES A ARC.

A chaque période, l'arc s'éteint et se rallume, ce que l'on peut facilement constater par la méthode du miroir tournant. Pour qu'il n'y ait pas un papillottement désagréable, il faut que la fréquence à la seconde soit au moins de 40 avec d'excellents charbons et plus grande, si on emploie des charbons de médiocre qualité.

Le ronflement caractéristique de l'arc alterné, dont la hauteur de son correspond à la fréquence du courant, est dû au déplacement purement mécanique de l'air refoulé par les courants de carbone

Digitized by Google

inversés à chaque demi-période et aux dilatations produites par les élévations périodiques de température.

M. Joubert a étudié l'arc en calant sur l'arbre de l'alternateur un grand disque formant écran, percé d'une fente radiale. En déplaçant l'œil derrière le disque, tout autour de l'axe, on voit successivement l'arc en ses diverses phases.

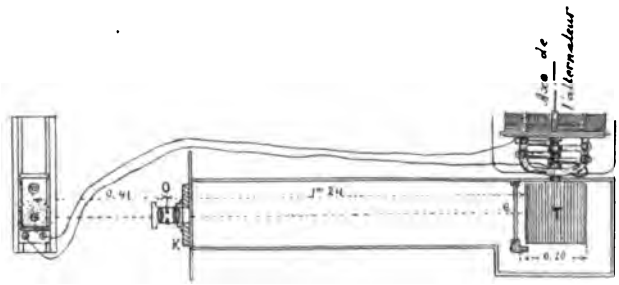


Fig. 236

M. Blondel (1), pour l'étude de l'arc alternatif, s'est servi de l'ingénieux dispositif représenté schématiquement sur la figure 236. T est un tambour de 20 c. m. de diamètre monté sur l'axe de l'alternateur et sur lequel on peut fixer une feuille de papier sensible.

Le tambour est enfermé dans une chambre noire qui porte à son

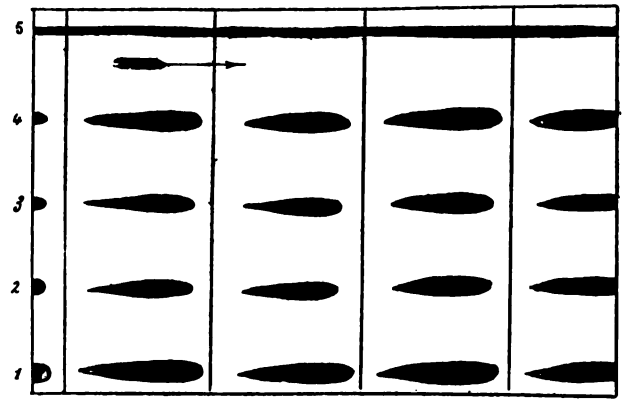


Fig. 237

extrémité un obturateur K et un objectif O, donnant sur un plan vertical tangent au cylindre, une image agrandie de l'arc. Un écran

1. *La Lumière électrique* des 19 et 26 décembre 1891.

Digitized by Google

vertical aussi rapproché que possible du tambour, est percé d'une fente horizontale de 1 m. m. de hauteur. Au moyen de ce dispositif, M. Blondel a pu isoler de l'arc une bande horizontale dans sa partie médiane.

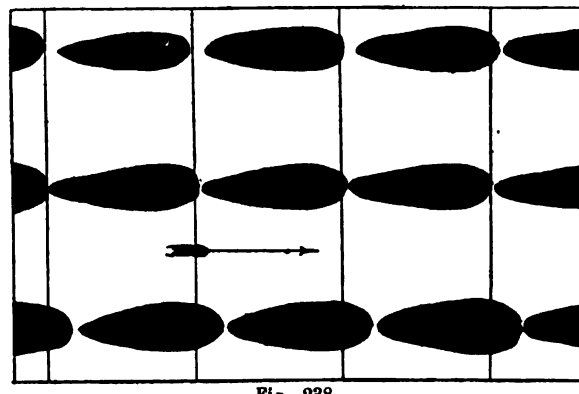


Fig. 238

Les photographies obtenues par ce procédé sont de véritables graphiques (voir fig. 237 et 238), l'axe horizontal représente les temps, la hauteur des taches noires (le cliché est un négatif) représente la largeur de l'arc à l'instant considéré, les lignes verticales indiquent les changements d'alternance.

Au moyen de miroir, réfléchissant l'image de l'arc, M. Blondel a pu en isoler une bande verticale, suivant l'axe des crayons. Dans ce cas, le graphique donne la longueur de l'arc et une idée du rapport de son éclat à celui des crayons.

La teinte plus ou moins noire des clichés (les variations de teintes ne sont pas reproduites sur les figures 235 et 236 qui sont simplement des schémas) n'est pas proportionnelle à l'intensité lumineuse de l'arc et des crayons, car : 1° la valeur actinique de l'arc est bien supérieure à celle des crayons et 2° l'intensité du cliché n'est pas proportionnelle à l'intensité lumineuse.

Dans ces expériences, M. Blondel employait un alternateur Siemens-Labour de 50 à 60 périodes à la seconde. Cet alternateur avait deux circuits distincts, donnant chacun 45 volts et 1.000 watts et ayant une résistance de 0,41 ohm et une s. i. de 0,066 quadrant. Ces deux circuits pouvaient être placés, soit en parallèle, soit en tension, un rhéostat permettait de faire varier l'intensité efficace du courant.

Digitized by Google

A chaque expérience, M. Blondel notait, la f. e. m. induite au moyen d'un voltmètre Zipernowski. L'écart des charbons était mesuré directement ou au moyen d'un réflecteur.

Sur les graphiques photographiques les durées d'allumage sont proportionnelles aux longueurs des taches noires et les extinctions aux distances séparant ces taches. De l'examen des photographies, M. Blondel a tiré les conclusions suivantes :

1° *Durée relative des extinctions et des allumages.*

Comme l'indiquent les schémas des figures 237 et 238, ce rapport est très variable, l'extinction peut être aussi longue que l'allumage, elle peut aussi être nulle.

Les arcs longs et peu intenses ont de longues extinctions (fig. 237).

Si l'on maintient l'écart *e* et la s. i. L constants, les allumages croissent avec I, l'intensité efficace.

Pour I et L constants, les extinctions croissent avec *e*.

Le tableau suivant indique les principales données pour les graphiques des figures 237 et 238.

DÉSIGNATION de la figure	NUMÉRO de l'essai	e en m.m.	I ampères	L quadrants	DIAMÈTRE des charbons en mm.	F. E. M. efficace induite volts
	1	2	5,9	0,0195	3	63
	2	4	4,2	0,0115	3	63
235	3	2	5,0	0,0115	3	63
	4	1	5,5	0.0115	3	60
	5	0.5	5,4	0,0115	3	42
	1	2.5	12,4	0,0119	10	59.1
236	2	3	12,4	0,0033	10	55.6
	3	3	10,5	0,0078	10	55.6

2° *Variation de la largeur de l'arc.*

Les taches présentent une forme oblongue montrant que l'arc, après s'être allumé sur une section minimum, s'élargit progressivement,

Digitized by Google

puis s'éteint plus brusquement, la s. i. semble donner des formes plus allongées.

La largeur initiale de l'arc semble être à peu près celle des petites facettes planes ou concaves qui terminent les pointes de charbon ; l'arc s'établit simultanément sur toute leur surface, puis déborde autour de ces pointes. La largeur des petits cratères augmente avec l'intensité efficace.

3° *Déplacement des taches d'allumage.*

La position des taches d'allumage par rapport aux origines des alternances est très variable, quelques-unes empiètent sur l'alternance suivante (fig. 236), c'est un décalage causé par la s. i.

4° *Variation d'éclat des charbons.*

Sur certaines épreuves obtenues, en isolant une bande verticale de l'arc, M. Blondel a constaté que l'éclat des crayons à la surface de passage présente des renforcements périodiques, correspondant au temps pendant lequel ils fonctionnent comme pôles positifs. Ceci provient de la même cause que pour l'arc continu, dans lequel le charbon positif a plus d'éclat que l'autre. Cet effet doit même être renforcé dans l'arc alternatif, car le cratère étant plus petit, à un moment donné, la densité du courant doit y être plus forte que dans le cas du courant continu.

Ainsi que M. Joubert l'avait constaté, l'éclat du charbon positif, très vif pendant l'allumage, tombe presque instantanément à une valeur très faible (le refroidissement doit suivre une loi exponentielle). La valeur moyenne de la température est donc inférieure à celle de l'arc continu et d'autant plus que les extinctions sont plus longues.

La température moyenne, et par conséquent, l'éclat de l'arc doit croître avec l'intensité efficace et la fréquence qui diminuent les extinctions, la première en valeur absolue, la deuxième en valeur relative.

L'éclat du carbone incandescent croît plus vite que la température avec laquelle augmente particulièrement la quantité de radiations lumineuses courtes.

Il résulte de cette dernière cause que l'arc est d'autant plus rouge que l'intensité efficace est plus faible. Pour ces diverses causes, l'arc

Digitized by Google

alterné est inférieur comme rendement à l'arc continu, surtout quand on ne fait pas entrer en ligne de compte la perte d'énergie dans les résistances auxiliaires d'élasticité des arcs continus (voir à ce sujet, un peu plus loin, les résultats des expériences de l'exposition de Francfort).

5° *Production, sens et vitesse du courant de carbone.*

M. Blondel a pu déterminer approximativement la vitesse du courant de carbone (qui est d'environ 162 m. par seconde), car les épreuves avec la bande verticale présentent des lignes inclinées, dont l'inclinaison dépend de la vitesse relative du courant de carbone et du tambour. Il a constaté également que le transport se produit toujours du crayon positif au crayon négatif, ce qui avait été contesté par plusieurs techniciens.

6° *Stabilité de l'arc.*

La stabilité dépend essentiellement de la durée des extinctions, car c'est de celles-ci qu'est fonction le refroidissement et par suite, l'augmentation de la résistance du gaz à la surface des crayons.

L'expérience montre qu'il est plus facile d'entretenir des arcs courts que des arcs longs.

L'intensité minimum nécessaire pour entretenir l'arc avec des crayons donnés est d'autant plus forte que l'écart est plus grand. Par exemple, M. Blondel a trouvé qu'il fallait 12 ampères au lieu de 8 quand on faisait passer de 2 à 3 mm. la longueur d'un arc.

Le diamètre des crayons doit être proportionné à l'intensité, dans des limites plus étroites que pour les arcs continus.

On a avantage à employer des crayons friables ou à mèche tendre, car ils donnent par désagrégation des poussières conductrices.

La production des petits arcs rencontre des difficultés plus grandes qu'avec les courants continus. Pour potentiel constant, si la stabilité est insuffisante il faut employer des procédés artificiels pour prolonger la durée d'allumage et faciliter le réallumage en cas d'extinction. Pour cela, on augmente la f. e. m. tout en introduisant une s. i. ce qui empêche l'augmentation de l'intensité efficace, tout en ne provoquant pas une perte d'énergie comme le ferait une résistance.

Avec un alternateur Siemens ayant une f. e. m. efficace induite de

Digitized by Google

41 volts, M. Blondel a trouvé que sans s. i. on ne pouvait établir un arc de 10 ampères de 1 mm. de longueur; avec L = 0,0035 quadrant on obtenait un arc à 8 ampères et avec L = 0,0119, on obtenait un excellent arc de 4 ampères avec 3 mm. d'écart. Pour avoir un arc monophote bien stable, il faut avoir au moins 60 volts efficaces.

Pour les arcs groupés en série, la stabilité augmente avec le nombre d'arcs. A Vienne, la maison Ganz et Cie place trois arcs de 8 ampères, avec un écart de 2 à 4 mm. sur un circuit à 100 volts. A Francfort, la maison Hélios (fréquence 50) a pu placer 4 arcs de 9 ampères sur un circuit à 110 volts. A Zurich, 5 lampes Siemens fonctionnent sur les circuits à 200 volts.

L'augmentation de la fréquence concourt à la stabilité de l'arc.

M. Blondel a essayé une même lampe avec des fréquences de 26 et 52, avec la même s. i., le même écart et la même tension; dans le premier cas, il fallait, pour maintenir l'arc, une intensité efficace de 15 ampères, dans le second cas, 10 ampères ont suffi.

Essais de la Commission de l'exposition de Francfort.

Dans ces essais, on a employé une table photométrique de près de 7 mètres de longueur (fig. 239), constituée au moyen de deux tables de 3 mètres. La table I était munie d'un photomètre de Lummer-Brodhun C. Sur la table II se trouvait le miroir D, qui permettait de projeter sur le photomètre suivant l'horizontale, la lumière de l'arc provenant de diverses directions.

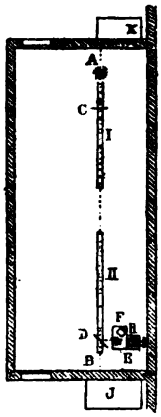


Fig. 239

Pendant les expériences, les charbons étaient placés dans un régulateur à main du Dr Edelmann de Munich. Ce régulateur était placé sur une table F ainsi qu'un appareil Krüss servant à mesurer l'écart des charbons. La table F, pouvait glisser le long d'une poutre et être placée à différentes hauteurs.

Même pour la détermination de l'intensité lumineuse dans la direction horizontale, on a laissé les charbons à côté de la table photométrique, afin d'avoir toujours la même diminution de lumière par le miroir.

Digitized by Google

Le courant était fourni par un alternateur Siemens et Halske, alimentant un transformateur de la même maison. L'étalon de lumière était une lampe Hefner à l'acétate d'amyle (qui vaut 0,114 carcel), mais celle-ci n'était utilisée qu'au commencement et à la fin de chaque essai, pour contrôler une lampe à incandescence. Cette dernière était alimentée par une batterie d'accumulateurs et un appareil de compensation, composé d'éléments Clarke, permettait de maintenir l'intensité suffisamment constante.

En J étaient placés les appareils de mesure, la tension était mesurée au moyen d'un voltmètre Cardew et l'énergie au moyen d'un wattmètre Ganz, ces appareils avaient été soigneusement étalonnés par la Commission. Cinq opérateurs relevaient simultanément et au commandement les diverses données, le premier au moyen de l'appareil Krüss et du régulateur à main maintenait l'écartement des charbons constant, le deuxième était au photomètre, le troisième et le quatrième relevaient la tension et le wattage, le cinquième était à l'appareil de compensation et maintenait l'intensité lumineuse de la lampe à incandescence constante.

On mesurait l'intensité lumineuse sur l'horizontale, à 20°, 40°, 56° au-

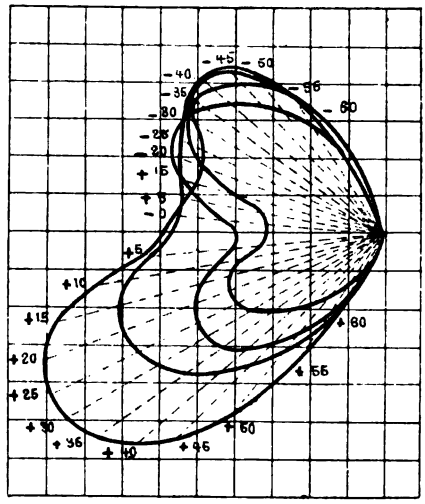


Fig. 240

dessus, à 20°, 40° et 60° au-dessous. On n'a pu mesurer 60° au-dessus, car la table touchait au plancher.

Digitized by Google

La table suivante donne les résultats de ces opérations qui ont servi à construire les courbes de la figure 240.

Longueur de l'arc en millimètres .	0,5	0,5	0,5	0,5
Tension en volts	30,2	29,7	31,9	32,4
Energie dépensée en watts . . .	222	228	296	317
Intensité lumineuse en lampes Hefner				
En-dessus à 56 degrés	212	159	222	239
-- 40 —	297	270	316	317
-- 20 —	256	300	257	289
Horizontalement 0 degré. . . .	157	196	289	283
En-dessous à 20 degrés	226	267	372	479
— 40 —	154	241	287	437
— 60 —	65	83	115	127

L'examen des courbes montre que la répartition de la lumière n'est pas symétrique par rapport à l'horizontale et que parfois le maximum d'intensité lumineuse se trouve au-dessus et parfois au-dessous de l'horizontale. Cependant en général, la répartition de la lumière concorde à peu près pour toutes les observations, il y a toujours entre 20° et 40° au-dessus et au-dessous de l'horizontale un maximum et un minimum suivant l'horizontale.

Les courbes ont été utilisées pour calculer l'intensité sphérique moyenne les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant:

CIRCUIT		INTENSITÉ LUMINEUSE en lampes Hefner			RAPPORT de l'intensité moyenne à l'intensité horizontale en %	ANGLE avec l'horizon de la portion d'intensité lumineuse maximum
Tension en volts	Energie en watts	suivant l'horizontale	maximum	sphérique moyenne		
30,2	222	157	297	96	60	— 40°
20,7	228	196	300	110	60	— 20°
91,9	296	289	372	135	47	+ 20°
32,4	317	283	479	156	55	+ 20°

Digitized by Google

Ainsi que l'indique la figure 241, la valeur maximum de l'intensité lumineuse, ainsi que la valeur de l'intensité sphérique moyenne peuvent être représentées par des droites, mais les essais sont trop peu nombreux, (la commission n'ayant pu toujours avoir le courant à sa disposition) pour démontrer absolument le fait.

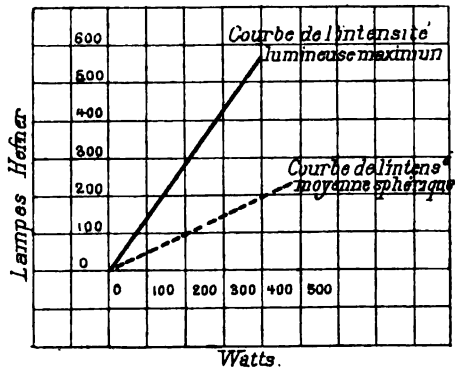


Fig. 241

Il résulte en outre des observations, que l'intensité moyenne sphérique, pour la même puissance électrique aux bornes (c'est-à-dire en ne tenant pas compte des résistances d'élasticité pour le courant continu) est inférieure à celle obtenue au moyen du courant continu.

Pour l'éclairage intérieur, on peut projeter le cône lumineux d'une lampe à arc vers le plafond blanc, ou sur un disque horizontal blanc, et éclairer ainsi la salle par diffusion. Ceci convient particulièrement bien pour les salles d'études, les salles de dessin, etc. C'est M. Jaspar qui en eut le premier l'idée à l'Exposition de Paris, en 1889.

La maison Siemens et Halske (1) emploie dans le même but, un diffuseur suspendu au-dessus de la lampe. (Fig. 242.) Ce diffuseur, de 1 m. à 1,30 m. de diamètre, a une forme conique et peut être construit très légèrement, au moyen de toile tendue sur des fils métalliques et peinte intérieurement au blanc de plomb. Au-dessous de la lampe est suspendu un cendrier en fer émaillé peint à l'intérieur en blanc, qui a le double but de réfléchir la lumière vers le haut du diffuseur et de recueillir les cendres et les parcelles de charbon tombant de l'arc.

1. *L'Electricien* du 19 janvier 1895.

Digitized by Google

Pour l'éclairage des rues, la maison Siemens et Halske entoure en outre l'arc d'un anneau en verre poli de section triangulaire qui reçoit les rayons du cône lumineux et les dirige sur la surface blanche du diffuseur, comme il est indiqué sur la figure 242. L'éclairage est ainsi très beau et uniformément réparti.

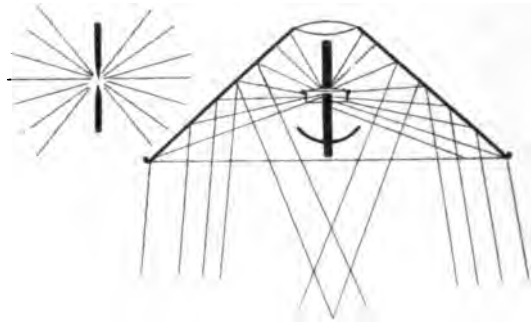


Fig. 242

La lampe doit naturellement être à point lumineux fixe. L'anneau de verre peut être constitué par 4 ou 6 segments supportés par un léger cadre métallique, il est ainsi plus facile à construire.

Ce système de diffuseur est beaucoup préférable et supérieur aux globes semi-opaques placés autour des arcs, car ces globes absorbent en pure perte de 30 à 60 % de la lumière et n'aident guère à la diffusion. Comme le dit M. Montillot dans l'*Electricien*, il est absolument insensé de s'évertuer à produire à grands frais de puissants foyers lumineux, pour gaspiller dans chacun d'eux, par l'emploi de globe semi-opaques le tiers ou même plus de la moitié de la lumière.

A dépense d'énergie égale, résistances additionnelles comprises, les arcs à courant continu présentent une supériorité de 10 à 15 % sur les arcs à courant alternatif au point de vue de l'éclairage. La consommation de charbon pour lampes à courant alternatif est de 20 % plus élevée que pour les courants continus.

Dans le cas où les crayons sont placés horizontalement bout à bout, ou bien placés à côté l'un de l'autre, l'usure est la même pour les deux. Dans le cas où l'un des charbons est placé au-dessus de l'autre, il s'use 1,08 fois plus vite.

Digitized by Google

Bougies électriques.

Les premières expériences d'éclairage électrique public à Paris ont été faites en 1878, au moyen des bougies Jablochkoff.

Le brevet de M. Jablockkoff date du 23 mars 1876, en voici la description complète (1) :

« Mon invention consiste dans la suppression absolue de tout mécanisme ordinairement usité dans les lampes électriques ordinaires. Au lieu de réaliser mécaniquement le rapprochement automatique des charbons conducteurs, au fur et à mesure de leur combustion, je fixe simplement ces charbons l'un contre l'autre en les séparant par une substance isolante, susceptible de se consumer en même temps que les charbons, du kaolin, par exemple. Les deux charbons ainsi préparés peuvent se planter dans une sorte de chandelier spécial et il suffit de les faire traverser par le courant d'une pile ou d'une source quelconque pour qu'un arc voltaïque prenne naissance d'une extrémité à l'autre ».

« Dans le cas d'un courant de même sens, l'un des charbons s'usant plus rapidement que l'autre, il y a lieu de se servir de charbons de sections inégales, afin de maintenir constante l'égalité de leurs longueurs. Au lieu de deux baguettes de charbon, fixées de part et d'autre d'une bande de kaolin, je puis me servir d'un tube de kaolin entouré d'un tube de charbon et renfermant un cylindre également en charbon.

« Pour l'allumage ou la mise en marche de la lampe, je réunis les deux extrémités libres des charbons par une petite bande de charbon, qui, au passage du courant rougit d'abord, puis se brûle et sert ainsi d'amorce à l'arc voltaïque.

« Lorsque j'ai besoin de maintenir le point lumineux à une hauteur constante par rapport au réflecteur, je me sers d'un mouvement d'horlogerie à déclenchement électrique commandé par une dérivation du courant, ou sans déclenchement, si il n'est pas nécessaire.

« Au lieu de charbons ordinaires, je puis employer des charbons agglomérés, qui pourront surtout convenir à la disposition en tube mentionnée plus haut. »

On essaya d'abord les bougies avec le courant continu, mais quoique

1. *Eclairage à l'Électricité*, par Hippolyte Fontaine.

Digitized by Google

l'on prit un charbon positif de section double, le charbon négatif rougissait sur une certaine longueur, s'amincissait et en un quart d'heure l'arc s'éteignait. On eut alors recours au courant alternatif et tout alla bien :

La bougie (fig. 243) se compose :

Fig. 243

1° De deux crayons ou baguettes cylindriques en charbon ayant généralement 0,004 m. de diamètre et 0,25 m. de longueur.

2° De deux douilles en cuivre dans lesquelles s'emboitent les crayons. Ces douilles en cuivre ont 0,045 m. de hauteur; elles sont ouvertes longitudinalement dans toute leur longueur.

3° D'une cloison isolante ayant 0,03 m. de longueur recevant les douilles en cuivre et les maintenant à écart convenable.

4° D'un colombin ou lame isolante, séparant les crayons dans toute leur longueur.

5° D'une pâte charbonneuse réunissant les deux crayons pour déterminer l'allumage.

Le colombin est formé d'une partie de baryte et de deux parties de plâtre, il disparaît complètement au fur et à mesure de la combustion des charbons.

Les bougies sont maintenues dans des mâchoires dont l'une est fixe et l'autre à charnière avec ressort.

Comme les bougies ne durent que deux heures environ, il faut pour un long éclairage, avoir plusieurs bougies toutes prêtes et les intercaler au fur et à mesure, le chandelier est alors muni de commutateurs, qui sont manœuvrés soit automatiquement, soit à la main.

M. Jablochkoff et M. Clariot ont imaginé des chandeliers pour l'allumage automatique des bougies, qui fonctionnent d'une manière très satisfaisante. D'autres chandeliers, appelés chandeliers en dérivation, provoquent l'allumage successif des bougies en commençant par la moins résistante, mais ce dispositif présente plusieurs inconvénients, il entraine entre autre une déperdition d'énergie dans les bougies non encore allumées.

M. Ignatiero a fabriqué des bougies concentriques, mais surtout

Digitized by Google

dans le but de s'en servir pour les courants continus, du reste le dispositif avait été prévu dans le brevet Jablochkoff.

On a aussi cuivré les bougies Jablochkoff, de manière à les faire durer un peu plus longtemps, mais le cuivrage portait atteinte à la fixité de la lumière.

Le principal avantage de la bougie est sa simplicité, mais elle présente de nombreux inconvénients et on tend de plus en plus à employer des régulateurs.

Les principaux inconvénients de la bougie sont les suivants :

Son rendement lumineux et moindre (probablement par suite du travail nécessaire à la vaporisation de l'isolant) et la lumière est moins fixe qu'avec un régulateur, de plus, quand l'arc s'éteint il ne se rallume pas seul. Le colombin provoque en outre des changements dans la coloration de la lumière et de vacillations par suite des impuretés qu'il contient. Les crayons reviennent plus cher que ceux pour les régulateurs.

Régulateurs.

Les régulnteurs sont du même genre que ceux pour courant continu, seulement on doit avoir bien soin de lameller les noyaux des électro-aimants, afin d'éviter les pertes par courants de Foucault.

Il existe une grande quantité de systèmes de régulateurs et l'on ne peut entrer dans la description de chacun d'eux, qui est du reste indiquée dans les catalogues des divers fabricants. Nous donnerons seulement les principes sur lesquels ils reposent.

Les conditions à réaliser sont les suivantes (1) :

1° Les charbons d'abord au contact, doivent s'écarter sous l'influence du courant, à une distance déterminée et variable avec l'intensité du courant.

2° Lorsque les crayons s'usent, un mécanisme doit les rapprocher de manière à ramener l'écart normal. Si l'arc se rompt, les deux charbons doivent être ramenés au contact.

Afin de realiser ces conditions, le régulateur comporte nécessairement :

1° Une force motrice tendant à ramener les charbons l'un vers

1. Eric Gérard. *Leçons sur l'électricité*, 2e volume.

Digitized by Google

l'autre. Le plus souvent l'effort moteur est le poids du charbon supérieur et de son support, parfois cependant on a recours à des ressorts ou à de petits électro-aimants.

2° Un mécanisme de séparation des charbons établissant l'écartement normal quand le courant passe. Ce mécanisme se réduit généralement à un électro-aimant traversé par le courant, qui attire un noyau ou une armature fixée à l'un des charbons de manière à provoquer la séparation.

3° Un mécanisme de rappel de l'usure des crayons, qui se confond parfois avec le précédent et qui d'autres fois en est distinct. Si par exemple, les charbons sont maintenus à une différence de potentiel constante, l'allongement de l'arc résultant de l'usure des charbons diminue l'intensité efficace et par suite l'électro-aimant commandant le mécanisme de rappel est actionné, ce qui permet aux crayons de se rapprocher.

Les mouvements des pièces auxiliaires, sont les plus ordinairement adoucis, par des amortisseurs ou des freins.

Quand plusieurs lampes sont placées en série, un mécanisme particulier met la lampe en court circuit, dès qu'il s'y produit une extinction amenée, par exemple par une rupture de crayons. Ce mécanisme peut être disposé pour introduire dans le circuit une s. i. donnant une résistance apparente égale à celle de la lampe.

Quand la lampe doit fonctionner pendant une nombre d'heures considérable, il faut que les charbons soient très longs et que leurs supports soient établis d'une manière particulière. On a bien essayé de combiner divers dispositifs pour remédier à cet inconvénient, c'est-à-dire pour introduire de nouveaux crayons dans le circuit, quand la paire est usée, mais la lumière est alors moins fixe.

Le mécanisme est plus compliqué, quand le point lumineux doit rester fixe dans l'espace, car il faut que les deux charbons soient mobiles.

Si on fixe d'une manière invariable le charbon inférieur, le mécanisme est moins compliqué, mais le point lumineux descend peu à peu, de sorte que l'on ne peut employer de réflecteur.

Voici d'après M. Pasqualini, le principe des organes de rappel de l'usure des charbons, les plus employés.

La lumière dépend de la longueur *e* de l'arc, de l'intensité effi-

Digitized by Google

cace I du courant, de la différence de potentiel efficace entre les crayons et du diamètre de ces derniers.

Les régulateurs peuvent avoir pour objet de maintenir constante E ou I, ou une fonction de ces deux quantités.

On a donc trois classes de régulateur.

1° Les régulateurs à intensité constante.

2° Les régulateurs à potentiel constant.

3° Les régulateurs différentiels.

Régulateurs à intensité constante.

Le schema de la figure 244, montre le principe d'un tel régulateur, dans lequel le charbon inférieur est supposé fixe.

Le poids du charbon supérieur et de son porte-charbon sert de moteur pour rapprocher les crayons. Ce poids est partiellement équilibré par le noyau mobile d'un électro-aimant dont les spires sont parcourues par le courant total. Les efforts sont transmis par des cordelettes à des poulies figurées au croquis.

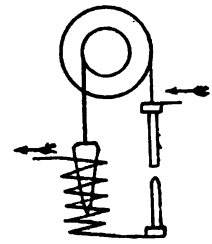


Fig. 244

Au moment de l'envoi du courant, le noyau est attiré et les charbons s'écartent ; l'équilibre est obtenu lorsque l'attraction magnétique compense la différence p, entre le poids moteur et celui du noyau.

Le noyau est proportionné de manière que sous l'influence d'un courant d'intensité efficace constante et dans les limites prévues, pour la course, l'attraction reste invariable, quelle que soit sa position dans l'électro-aimant. Cette condition est réalisée dans de très grandes limites avec un noyau à section décroissante.

Dans cette hypothèse en appelant n le nombre de spires et K une constante, la condition d'équilibre est :

$$K\,n\,I = p$$

d'où l'équation du régulateur :

$$I = C^{te}$$

Afin que la force attractive reste aussi constante que possible, on est amené à limiter la course du noyau, en employant des poulies de diamètres différents, comme l'indique le schéma.

Digitized by Google

Dans certains appareils l'électro-aimant régulateur n'agit pas directement sur le porte-charbon supérieur. Celui-ci est sollicité par un mécanisme dont le fonctionnement est arrêté par l'armature de l'électro-aimant. Dans ce système que l'on peut appeler *à déclic*, par opposition au système à *action directe*, l'électro-aimant a pour effet de vaincre la résistance d'un ressort qui s'oppose au mouvement de l'armature. En appelant f l'effort résistant du ressort, l'équation du régulateur devient :

$$K\,n\,I = f$$

Le système à déclic, n'a pas une action continue, comme le système à action directe. Il ne fonctionne que lorsque l'intensité du courant dépasse une limite déterminée.

Régulateur à potentiel constant. — Dans une seconde classe d'appareils, dont la disposition théorique est indiquée sur la figure 245, le rappel de l'usure est effectué par un solénoïde régulateur, en dérivation par rapport aux crayons, le poids du noyau étant ici plus grand que le poids du porte-charbon supérieur.

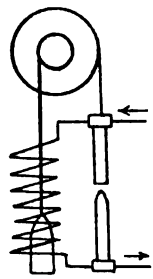


Fig. 245

Un mécanisme spécial, non indiqué au dessin, a pour effet de maintenir les charbons au contact lorsque le courant est nul. Lorsque le courant passe, l'écart normal est déterminé par l'équilibre entre le poids p et l'attraction magnétique du solénoïde. En appelant n' le nombre de spires du solénoïde, r' sa résistance apparente et I' l'intensité efficace du courant qui le traverse, on a :

$$K'\,n'\,I' = p$$

Mais comme :

$$I' = \frac{E}{r'}$$

$$K'\,n'\,\frac{E}{r'} = p$$

La seule variable, étant E, l'équation du régulateur est :

$$E = C^{te}$$

d'où le nom de *régulateurs à potentiel constant*, donné à cette classe d'appareils.

Digitized by Google

Généralement dans ces régulateurs le charbon supérieur est retenu par un déclic commandé par le solénoïde et l'écart des charbons est produit par un électro-aimant en série, qui déplace le charbon inférieur lors de la fermeture du circuit. Lorsque l'arc est établi et qu'il s'allonge, il arrive un moment où le déplacement du noyau du solénoïde est suffisant pour agir sur le déclic, de sorte que le charbon supérieur redescend par son poids, jusqu'à ce que l'arc normal soit rétabli.

Régulateurs différentiels. — Dans une troisième classe d'appareils, les deux mécanismes précédents sont combinés (fig. 246). Un double noyau équilibre exactement le poids du crayon supérieur et de son support et pénètre à la fois dans deux solénoïdes, dont l'un est en dérivation et l'autre en série par rapport aux crayons, Au moment de la fermeture du circuit, le courant principal est très intense, l'action du solénoïde inférieur prédomine, les crayons s'écartent et l'arc jaillit. L'écartement normal est réglé par la condition :

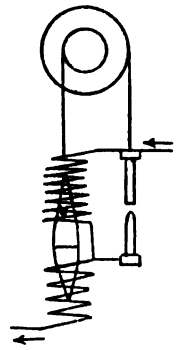


Fig. 246

$$K\,n\,(I + I') = K'n'\,I'$$

d'où :

$$\frac{E}{I} = \frac{K\,n\,r'}{K'n' - K\,n} = C^{te}$$

Dans ce système, le rapport de la différence de potentiel efficace à l'intensité efficace du courant, c'est-à-dire la résistance apparente de l'arc reste constante.

Ces régulateurs sont dits ***différentiels*** ou à ***résistance constante***. Ils sont les plus sensibles aux variations des facteurs E et I, par le fait qu'ils obéissent à une action différentielle.

§ 3. — ÉCLAIRAGE.

Il est généralement très difficile de déterminer *a priori* le nombre de lampes, d'un type donné, à installer pour l'éclairage d'un local, il faut comparer avec des éclairages déjà existants ; cependant les données suivantes pourront être utiles :

Digitized by Google

Pour lire aussi bien qu'à la lumière du jour, il faut un éclairement de 50 bougies à un mètre, pour lire commodément il faut 10 bougies.

Dans les filatures, il faut un éclairement total moyen de 5 à 10 bougies. Pour les tissages, il faut compter par métier, pour la couleur deux lampes de 16 bougies, pour les métiers ordinaires une lampe de 16 b. pour deux, pour l'écru une lampe de 10 b. pour deux métiers.

Dans les ateliers ordinaires, l'éclairement moyen doit être de 2 b. et dans les ateliers d'ajustage de 3 à 4 b. Il faut en outre éclairer spécialement les diverses machines-outils.

Dans les théâtres, on admet pour la salle et la scène 0,5 bougie par m^2. Pour l'éclairage brillant de la scène, il faut compter 1,5 par m^2 ou 20 b. par m^2. (*Aide mémoire de l'Électricien*, par MM. Picard et David).

Le tableau suivant extrait des données publiées par l'*Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft* peut être très utile pour un projet d'éclairage.

Nombre de bougies par mètre carré à installer :

1° *Dans les maisons d'habitation*

Salons 4,50 à 6.	Chambres à coucher 1,50 à 2,50.
Salles à manger 3,50 à 4.	Corridors et dépendances 1 à 2.

2° *Bureaux*

Bureaux principaux 5 à 7.	Bureaux secondaires 2,5 à 3.
Bureaux privés 2 à 4.	

3° *Magasins*

Salles de vente 5 à 8	Comptoirs 2, 5 à 6.
Vitrines 4 à 7 (par mètre courant).	

4° *Hôtels*

Salons pour fêtes 10,5 à 15.	Salons ordinaires 6 à 8.
Chambres élégantes 4 à 5.	Chambres ordinaires 3 à 4.
Corridors, dépendances 1, 5 à 2.	

Éclairage des grands espaces au moyen de lampes à arc. — On doit considérer l'éclairement du plan horizontal. Un éclairement de n bougies en un point du plan signifie que ce point est éclairé comme si n bougies étaient placées à un mètre, dans la direction perpendiculaire au plan.

Digitized by Google

Si un foyer lumineux est placé en O (fig. 247) à une hauteur h au-dessus du sol et si l'intensité lumineuse dans la direction OB est L,

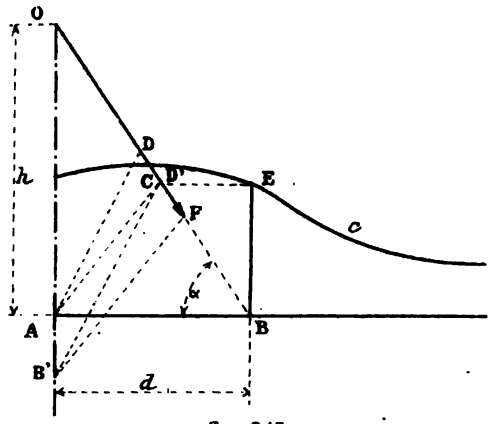


Fig. 247

B étant à une distance d de la verticale, O B faisant un angle α, avec le plan horizontal, l'éclairement du plan au point B est donné par les relations :

$$e = \frac{L\,h}{(h^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{L}{h}\sin^3\alpha$$

Une construction graphique très simple permet de déterminer l'éclairement au point B.

L'intensité lumineuse étant représentée par OF, de sorte que l'on a $L = m\,OF$, on prend $OB' = OB$, on joint B' à F et par A on mène AC parallèle à B' F, on joint C à B' et par A on mène AD parallèle à B'C.

On prend ensuite $BD' = OD$ et on mène par D' l'horizontale D'E ; BE représente l'éclairement au point B et on a :

$$e = \frac{m\,BE}{h^2}$$

h étant la hauteur du foyer au-dessus du plan horizontal.

Si la courbe d'intensité lumineuse du foyer est donnée, on pourra facilement construire par points la courbe c de l'éclairement du plan horizontal.

Digitized by Google

De cette courbe on déduira les rayons des circonférences concentriques au pied du foyer, sur lesquelles sont placés les points qui ont un éclairement donné.

On pourra alors tracer sur du papier calque, à l'échelle du plan de l'espace à éclairer, les circonférences éclairées avec des intensités décroissantes données, par exemple, de bougie en bougie.

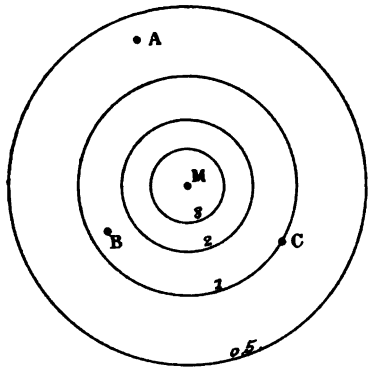


Fig. 248

Soit par exemple (fig. 248) les cercles éclairés par un foyer placé à une certaine hauteur au-dessus du centre commun, avec des intensités de 0,5, 1, 2, 3 bougies. Si A B C, sont les projections de trois foyers sur le plan, et si l'on veut trouver l'éclairement total au point M, on posera le papier calque sur le plan de manière à ce que le centre commun des cercles coïncide avec M.

En interpolant pour les foyers tombant entre deux cercles, on aura très approximativement :

Eclairement dû à A — 0,7 bougie.
» » B — 1,5 »
» » C — 1,0 »
Eclairement total — 3,2 bougies.

Ayant ainsi déterminé l'éclairement d'un certain nombre de points convenablement choisis du plan horizontal, on pourra tracer par interpolation les courbes d'éclairement corespondant à des nombres donnés de bougies, on aura ainsi des courbes d'intensité lumineuses rappelant les courbes de niveau d'un plan topographique.

On pourra en déduire l'éclairement moyen, comme l'indique M. Maréchal dans son ouvrage sur l'éclairage à Paris.

En projection, les courbes d'égal éclairement délimitent une série de surfaces s_1, s_2... s_n, que l'on mesure au planimètre.

Soient, e la différence constante d'éclairement existant entre deux courbes consécutives ; e_0 l'éclairement minimum, e' la différence entre l'éclairement maximum et celui de la courbe de plus grand

Digitized by Google

éclairement ; e'' la différence entre la courbe de plus petit éclairement et l'éclairement minimum e_0. On aura approximativement :

$$S\,E = \frac{e' s_1}{2} + e\left(\frac{s_1 + s_2}{2} + \frac{s_2 + s_3}{2} + \ldots\ldots + \frac{s_{n-1} + s_n}{2}\right) + e'' \frac{s_n + S}{2} + e_0\,S$$

S étant la surface totale et E l'éclairement moyen.

Plus le rapport $\frac{e_0}{E}$ est voisin de l'unité, plus l'éclairage est satisfaisant.

M. Maréchal estime que dans des rues en aucun point l'éclairement ne doit être inférieur à 0,05 bougie.

Pour les rues peu fréquentées, etc., l'éclairement moyen doit être de 1 bougie, de même pour les chantiers et les gares.

Pour les rues, les places très fréquentées, les boulevards, l'éclairage moyen doit atteindre 2 bougies.

On place ordinairement le point lumineux d'un arc de 7 ampères à 6 mètres au-dessus du sol, celui d'un arc de 10 ampères à 8 ou 10 mètres, celui d'un arc de 20 ampères à 15 ou 18 mètres.

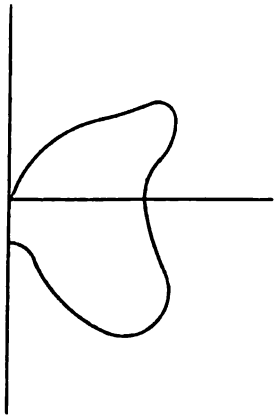


Fig. 249

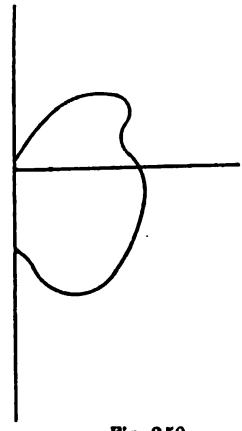


Fig. 250

La courbe de la figure 249, déterminée par M. Blondel, est la courbe photométrique d'un arc à courant alternatif avec globe en opaline et celle de la figure 250, correspond à un globe en opale.

Etant donné pour un arc muni de globe, l'intensité moyenne, on pourra facilement déterminer l'échelle de ces courbes et tracer les courbes d'éclairement sur un plan horizontal.

Digitized by Google

CHAPITRE V

Transformation directe d'un courant en un courant d'un autre système.

§ 1er — COMPARAISON DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE COURANTS AU POINT DE VUE DES LIGNES

Dans le premier volume (page 194), nous avons comparé les poids des lignes, pour les divers systèmes de courants alternatifs employés dans la pratique, c'est-à-dire les courants mono, bi, et triphasés, en considérant d'abord seulement la tension aux bornes du générateur (alternateur ou transformateur élévateur de tension) puis ensuite la tension en ligne. Au point de vue de *l'isolement* des conducteurs, il y a lieu de considérer également *la différence de tension* entre deux conducteurs.

Comme les tensions sont des fonctions périodiques simples de mêmes périodes, les différences de tension sont également des fonctions périodiques simples de même période (1er volume page 14).

Dans le cas du courant *monophasé*, la différence de tension maximum entre deux fils de ligne est égale à la tension maximum au générateur.

Dans le cas du *courant biphasé avec deux fils de retour*, la valeur instantanée de tension dans un circuit est E sin kt, et dans l'autre E sin $\left(kt + \frac{\pi}{2}\right)$ la valeur instantanée de la différence de tension est :

$$E\left\{\sin kt - \sin\left(kt + \frac{\pi}{2}\right)\right\} = X \sin (kt + \varphi)$$

En appliquant la formule (1er volume page 15).

On a :

$$X^2 = 2\,E^2 \qquad X = E\sqrt{2}$$

Digitized by Google

Si l'on ne veut pas dépasser une différence de tension maximum E entre les fils, il faut développer au générateur une tension maximum $\frac{E}{\sqrt{2}}$ c'est-à-dire que pour la même puissance à transporter, les pertes sur la ligne seront doublées.

Pour avoir la même perte en ligne, qu'avec le courant monophasé, la section devra être double, ce qui doublera le poids de la ligne.

Dans le cas du *courant biphasé avec fil de retour* unique, les tensions dans les trois fils peuvent être exprimées très approximativement (1er volume page 162) par les relations :

$$e_1 = E \sin kt$$

$$e_2 = E \sin (kt + \frac{\pi}{2})$$

$$e = \sqrt{2}\ E \sin (kt + \frac{\pi}{4})$$

La différence de tension entre les deux premiers fils sera :

$$e_1 - e_2 = E \left\{ \sin kt - \sin (kt + \frac{\pi}{2}) \right\} = X \sin (kt - \varphi)$$

La valeur maximum sera :

$$X = E\sqrt{2}$$

On aura également :

$$e - e_1 = E \left\{ \sqrt{2} \sin (kt + \frac{\pi}{4}) - \sin kt \right\} = X' \sin (kt - \varphi')$$

$$X'^2 = E^2 \left\{ 2 + 1 - 2\sqrt{2} \cos \frac{\pi}{4} \right\} = E^2 (3 - 2) = E^2$$

$$X' = E$$

La valeur maximum de la différence de tension entre les fils est $E\sqrt{2}$, pour que cette valeur soit E, il faudra développer au générateur une tension $\frac{E}{\sqrt{2}}$.

Le poids de la ligne sera 1,46 fois plus fort que dans le cas du courant monophasé (1er volume page 195).

Digitized by Google

Dans le *cas du courant triphasé avec montage en étoile,* la différence de tension entre deux fils est :

$$e - e_1 = E\left\{\sqrt{2}\sin\left(kt+\frac{\pi}{4}\right) - \sin\left(kt+\frac{\pi}{2}\right)\right\} = X''\sin\left(kt-\varphi''\right)$$

$$X''^2 = E^2\left\{2+1-2\sqrt{2}\sin\frac{\pi}{4}\right\} = E^2$$

$$X'' = E$$

On aura :

$$E\left\{\sin\left(kt+\frac{2\pi}{3}\right) - E\sin kt\right\} = X\sin\left(kt+\varphi\right)$$

$$X^2 = E^2\left\{1+1-2\cos\frac{2\pi}{3}\right\} = 3E^2$$

$$X = E\sqrt{3}$$

Dans le cas où l'on ne considère que la tension au générateur, le poids de la ligne est 25 % de celle pour le courant monophasé. Si on ne veut pas dépasser la tension E entre deux fils de ligne il faudra que la tension au générateur soit $\frac{E}{\sqrt{3}}$ et pour la même puissance à transporter l'intensité efficace du courant sera $\sqrt{3}$ fois plus grande il faudra employer pour la même perte en ligne une section triple. Le poids de la ligne sera donc 75 % du poids de la ligne pour courant monophasé.

Pour le courant triphasé avec montage en triangle, la tension maximum en ligne est : $E' = E\sqrt{3}$ (1er volume page 196).

Comme dans le cas précédent, la tension maximum entre deux fils de ligne sera :

$$X = E'\sqrt{3} = 3E$$

On devra employer, pour ne pas dépasser la tension E entre deux fils de ligne, la tension $\frac{E}{3}$ au générateur, l'intensité du courant sera trois fois plus forte et la perte en ligne neuf fois plus forte ; il faudra pour la même perte de travail avoir une ligne neuf fois plus lourde. Comme la ligne avec même tension au générateur pèse 75 % de la ligne avec courant monophasé, la ligne pour même différence de tension et même perte de travail, sera $0{,}75 \times 9 = 6{,}75$ plus lourde que pour le courant monophasé.

Digitized by Google

En résumé, si l'on compare le poids des lignes pour la même perte de puissance, avec leur poids dans le cas du courant monophasé.

On a : 1° employant la *même tension au générateur* (le poids pour la ligne à courant monophasé étant 100) comme poids de lignes :

Pour le courant biphasé avec 2 fils de retour	100
» » » » 1 » »	73
» » triphasé montage en triangle	75
» » » » en étoile	25

2° Si *la tension maximum dans les circuits doit avoir la même valeur :*

Pour le courant biphasé avec 2 fils de retour	100
» » » » 1 » »	146
» » triphasé montage en triangle	225
» » » » en étoile	25

3° Si *la différence de tension maximum entre les fils doit être la même :*

Pour le courant biphasé avec 2 fils de retour	200
» » » » 1 » »	146
» » triphasé montage en triangle	675
» » » » en étoile	75

§ 2. — TRANSFORMATION DES COURANTS

La transformation peut toujours se faire en employant un moteur actionnant une génératrice produisant le courant du système que l'on veut obtenir pour un emploi particulier et même, comme nous l'avons vu, l'ensemble peut être réuni sous forme d'une machine unique (page 157), mais il existe, en outre, des appareils spéciaux produisant directement la transformation. On peut au moyen de ces appareils transformer :

1° Le courant continu en courant monophasé et vice versa ;
2° Le courant continu en courants polyphasés et vice versa ;
3° Le courant monophasé en courants polyphasés ;
4° Les courants triphasés en courants biphasés et vice versa.

Digitized by Google

§ 3. — TRANSFORMATION DU COURANT CONTINU EN COURANT MONOPHASÉ ET VICE VERSA

Onduleur Solignac.

En dérivation sur les primaires de deux transformateurs T_1 et T_2, montés en tension, sont placées des résistances r_1, r_2, r_3, etc. (fig. 251), dont les extrémités communiquent par l'intermédiaire de séries de balais b_1 et b_2, avec des commutateurs tournants A_1 et A_2 montés sur un même arbre. Les parties conductrices (hachurées) de ces commutateurs sont en communication, par l'intermédiaire des balais B_1 et B_2, avec la source du courant continu.

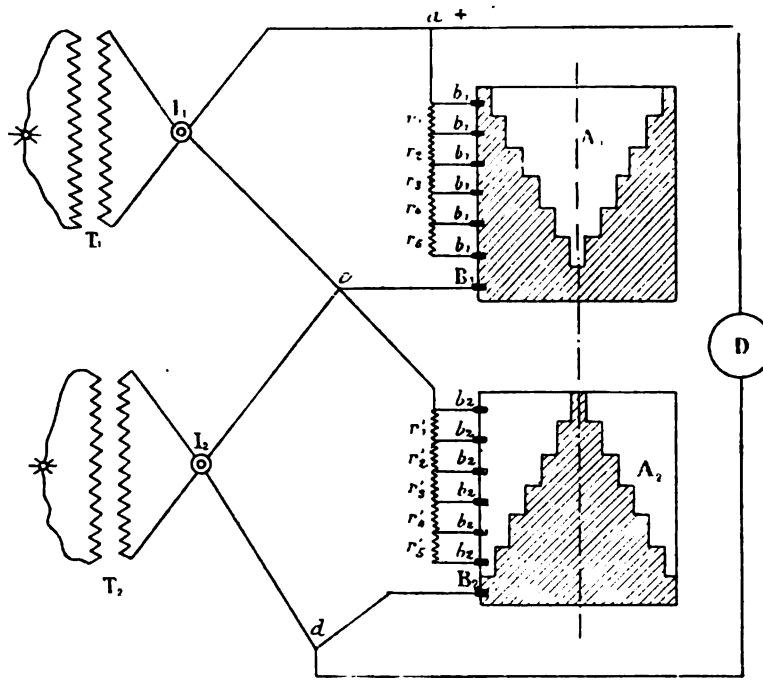


Fig. 251

Si les deux commutateurs solidaires sont dans la position indiquée sur le dessin, il est facile de voir que le courant provenant de la dynamo D passera directement par $a\, b_1\, B_1\, c$, le primaire de T_1, qui a une certaine résistance et surtout de l'impédance ne sera pratiquement parcouru par aucun courant. Le primaire de T_2, par contre, puisque les balais b_2 sont isolés, sera parcouru par le courant total.

Digitized by Google

Quand les commutateurs auront tourné d'un certain angle, le premier balai b_1 touchera à l'isolant et le courant en a se partagera entre le primaire de T_1 et le circuit $a\ B_1\ c$, qui a une résistance r_1. A ce moment, le balai inférieur b_2 du commutateur A_2 sera sur la partie conductrice, et le courant, à partir de c, se partagera entre le primaire de T_2 et le circuit $c\ b_2\ B_2\ d$.

On voit donc qu'à mesure que les commutateurs tournent, le courant dans le primaire de T_1 augmente et que par contre le courant dans le primaire de T_2 diminue. Il en sera ainsi jusqu'à ce que tous les balais b_1 soient sur l'isolant et alors le courant total passera dans le primaire de T_1, tandis que tous les balais b_2 étant sur la partie conductrice du commutateur A_2, pratiquement il ne passera aucun courant dans le primaire de T_2. A partir de ce moment, l'intensité du courant du primaire de T_1 diminuera, tandis que celle du courant du primaire de T_2 augmentera.

En plaçant dans les circuits primaires des commutateurs inverseurs I_1 et I_2, renversant le sens des connexions chaque fois que l'intensité du courant passe par o, les primaires seront parcourus par des courants alternatifs. Les courbes théoriques de ces courants étant représentées figure 252, l'une en traits pleins, l'autre en traits pointillés.

M. Hospitalier a procédé à des essais de rendement sur un onduleur Solignac et a obtenu les résultats indiqués dans le tableau de la page 292,

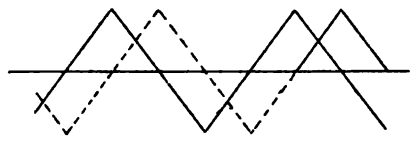


Fig. 252

Les puissances P_0, P_1 et P_2 dans ce tableau, sont exprimées en unités arbitraires, la puissance totale ondulée était à peu près de 14.000 w.

On n'a pas tenu compte dans ces expériences de la puissance nécessaire pour la rotation des cylindres commutateurs.

En somme, dans ce système, on fait varier les ampères-tours du transformateur en faisant varier l'intensité du courant, tandis que dans le système de MM. Hutin et Leblanc, que nous étudierons plus

Digitized by Google

loin, on fait varier les ampères-tours en faisant varier le nombre de spires.

NUMÉRO de la série d'expérience	Puissance fournie à l'onduleur P_0	Puissance à la sortie de l'onduleur P_1	Rendement de l'onduleur $\frac{P_1}{P_0}$	Puissance à la sortie du transformateur P_2	Rendement de l'ensemble $\frac{P_2}{P_0}$	Vitesse de l'onduleur tours par minute
1	145	135	0,93	114	0,78	1120 1150
2	141	131	0,93	113	0,80	1130 1170
3	142	133	0,936	114	0,805	600 620
Moyennes.	142,66	133	0,932	113,66	0,796	»

Le *transformateur inverseur* (1) de M. Félix Lucas, ingénieur en chef des ponts et chaussées, permet de donner au courant alternatif une fréquence qui ne dépend que du nombre de tours de l'appareil employé.

Deux roues en cuivre A et B (fig. 253), isolées entre elles, sont montées sur un arbre. Chacune de ces roues a un moyeu cylindrique et porte un certain nombre de secteurs faisant entre eux des angles égaux et laissant des vides égaux aux pleins. Les deux roues, placées l'une contre l'autre et isolées par de l'ébonite, sont disposées de telle sorte que les vides de l'une correspondent aux pleins de l'autre. La pièce d'ébonite qui isole les deux roues, projette des saillies qui viennent remplir les secteurs vides, cette pièce isole également les moyeux de l'arbre métallique. L'ensemble forme donc une large roue ayant de part et d'autre deux moyeux de cuivre, la jante soigneusement tournée présente, à droite et à gauche, une succession régulière de parties en cuivre et de parties en ébonite, ces deux portions étant isolées entre elles par de l'ébonite.

La figure 253 donne le schéma des connexions, les deux roues y sont représentées de face et dans le même plan (chaque roue porte 15 secteurs en cuivre et 15 secteurs en ébonite, l'ébonite étant représentée par des surfaces hachurées). Sur la jante de chacune des

1. L'*Electricien* du 8 juillet 1893.

Digitized by Google

roues sont disposés deux balais, MN et PQ. Ces balais sont reliés deux à deux, comme l'indique le schéma, le circuit extérieur étant relié aux points *a* et *b*.

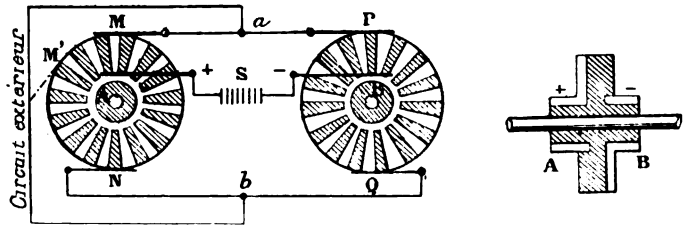


Fig. 253

Le courant continu fourni par la source S (dynamo ou batterie d'accumulateurs), est envoyé aux moyeux de A et de B par deux balais frotteurs communiquant respectivement avec le pôle positif et avec le pôle négatif.

Dans la position indiquée sur la figure, comme les balais M et Q sont en relation avec les pôles de la source, tandis que les balais N et P sont isolés, un courant parcourt le circuit extérieur dans le sens *ab*. Quand les roues ont avancé d'une division $\left(\frac{1}{30}\right.$ de tour,

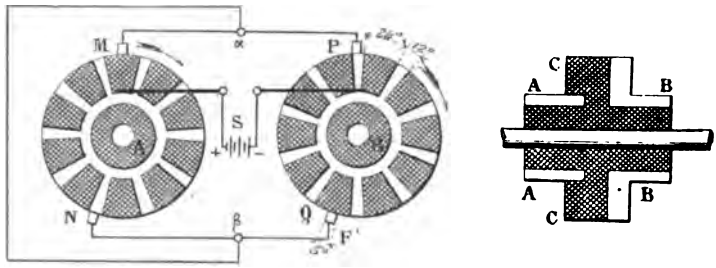


Fig. 254

dans le cas de la figure), ce sont au contraire, les balais P et N qui sont en communication avec les pôles de la source; tandis que les balais M et Q sont isolés, de sorte que le circuit extérieur est parcouru par un courant de sens *ba*. On voit donc qu'il suffit de faire tourner l'appareil pour recueillir un courant alternatif dans le circuit extérieur. Si N est le nombre de tours de l'appareil par seconde, n le nombre de secteurs de cuivre, la fréquence du courant sera Nn. Il faut que les contacts des balais, soient très étroits et ne touchent pour ainsi dire que suivant une génératrice, car lorsque les quatre balais

Digitized by Google

se trouvent en contact avec les génératrices séparatrices du cuivre et de l'ébonite, la source d'électricité se trouve mise en court-circuit. On peut, en modifiant le dispositif, ainsi qu'il est indiqué sur la figure 254, donner aux contacts des balais une plus grande surface

Les secteurs de cuivre correspondent à un angle de $\frac{2\pi}{3n}$ et les secteurs d'ébonite à un angle de $\frac{4\pi}{3n}$. Les balais ont une longueur angulaire de $\frac{\pi}{3n}$ $\left(\text{sur la figure } n=10, \frac{180°}{3n}=6°\right)$ et sont disposés de telle sorte que quand M se trouve au milieu d'un secteur d'ébonite, N et P soient au milieu d'un secteur de cuivre et Q au milieu d'un secteur d'ébonite. Les courts-circuits sont alors instantanés, ils ont lieu quand dans chaque balai une des arêtes correspond à une génératrice séparatrice de cuivre et d'ébonite, ce qui a lieu simultanément pour les quatre balais.

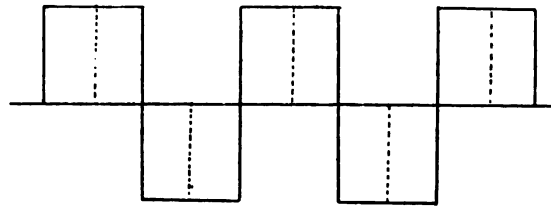


Fig. 255

Le courant alternatif ainsi recueilli n'est pas sinusoïdal, théoriquement, c'est-à-dire en supposant les courts-circuits rigoureusement instantanés et en négligeant l'influence de la s. i., il est représenté par la courbe de la figure 255. L'intensité efficace et l'intensité moyenne du courant alternatif sont égales à l'intensité du courant continu.

En ajoutant $2m$ paires de balais géminés, décalés de $\frac{1}{m}$ de période, ou peut recueillir m courant décalés de $\frac{1}{m}$ de période, c'est-à-dire des courants polyphasés.

En particulier, le système triphasé est intéressant, il est facile de voir que si l'on joint les centres des étoiles, aux extrémités des circuits, on obtient dans ce fil un courant alternatif de même nature, ayant même intensité que chacun des courants partiels, mais ayant trois fois plus de périodes (on sait que dans le cas de courants sinu-

Digitized by Google

soïdaux, on n'obtient dans ce fil aucun courant). On obtient donc facilement la *triplication* du nombre de périodes, ce qui est important dans certains cas.

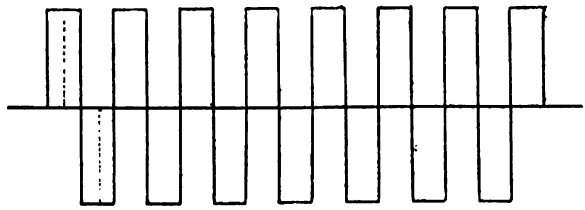


Fig. 256

M. Félix Lucas a fait construire, par la maison Sautter-Harlé, deux transformateurs, l'un répondant à la figure 1, avait 15 secteurs de cuivre, l'autre répondant à la figure 2, en avait 10. Dans le premier transformateur, les balais avaient une disposition spéciale. Le balai double se composait d'un cylindre de cuivre de 25 mm. de diamètre, tangent aux deux roues suivant une génératrice de la surface cylindrique extérieure. Chacune des parties isolées entre elles, M et P, avait une largeur un peu plus forte que celle de la roue correspondante.

Ce balai double tournait donc et ne pouvait perdre sa forme cylindrique, un balai fixe en toile métallique appuyant sur chacune des deux parties permettait de capter le courant.

Chacun des deux transformateurs pouvait être actionné par un petit moteur Gramme, tournant à 2.000 tours à la minute.

La fréquence du courant pour le premier appareil était :

$$\frac{2.000 \times 15}{60} = 500,$$

pour le second :

$$\frac{2.000 \times 10}{60} = 333.$$

M. Lucas a constaté la continuité et l'invariabilité presque parfaite du débit de la source génératrice (dynamo ou batterie d'accumulateurs) pendant le captage d'un courant monophasé ou de courants polyphasés. Dans ce dernier cas, l'expérience confirme la théorie, on obtient dans le fil reliant les centres des deux étoiles un courant alternatif de fréquence triple de celle des courants élémentaires.

Digitized by Google

En envoyant le courant alternatif de l'un ou l'autre des transformateurs dans le circuit primaire d'une bobine de Ruhmkorff (dont on immobilise le trembleur) on obtient dans le circuit secondaire un courant alternatif de même période, mais de tension plus élevee, au moyen duquel on produit aisément l'illumination d'un tube de Gessler, alors même que le circuit reste ouvert, c'est-à-dire quand une seule de ses extrémités est reliée à l'un des bouts du tube.

Le transformateur avec secteurs métalliques égaux aux secteurs isolants, permet à diamètre égal et pour une même vitesse de rotation, une fréquence plus grande que celle que pourrait donner l'autre système. Les roues distributrices pourraient être simplement isolées à l'air sans interposer entre elles une masse d'ébonite ; chacune d'elles pourrait se composer d'une roue métallique dont la jante serait dentée vers sa périphérie et une substance isolante remplirait les vides entre ces dents.

M. Lucas fait le calcul suivant, en supposant aux roues un diamètre de 1 m. c'est-à-dire 3,14 m. de circonférence extérieure, on pourra avoir 314 dents de 5 m. m. de largeur et en donnant à la roue une vitesse de 32 tours à la seconde, la fréquence pourra être de 10.000. En donnant à chaque roue 10 c. m. de largeur on pourrait débiter 50 ampères, en employant un seul système de balais géminés (M. Lucas arrivait à débiter 5 ampères par c. m. de largeur, sans production d'étincelles, le calage des balais étant fait avec soin) ; mais comme il serait possible d'employer simultanément 20 systèmes de balais géminés, pour phases concordantes, attelés en quantité, on pourrait obtenir un débit de 1.000 ampères, à une fréquence de 10.000.

Appareil de M. Pollak pour la transformation du courant monophasé en courant continu.

Le courant alternatif est employé à charger une batterie d'accumulateurs, à laquelle on emprunte ensuite le courant continu.

Cet appareil consiste en un commutateur, placé sur l'arbre d'un petit moteur synchrone, ce commutateur portant autant de contacts que le moteur comporte de pôles.

Dans l'exemple de la figure 257, le moteur comporte 8 pôles et le commutateur 8 touches. Les touches 1, 2, 3, 4 sont reliées entre elles

Digitized by Google

et communiquent avec un des pôles de la batterie d'accumulateurs ; les quatre autres touches 5, 6, 7 et 8 sont reliées à l'autre pôle de la batterie. Deux paires de brosses *c d* et *e f* frottent de manière à être en contact avec deux touches consécutives du commutateur, la paire de balais *c d* est reliée par le fil K à l'une des extrémités du circuit monophasé, la paire de balais *e f* à l'autre extrémité.

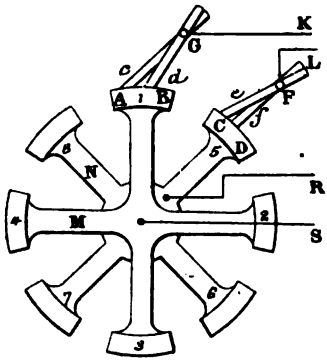


Fig. 257

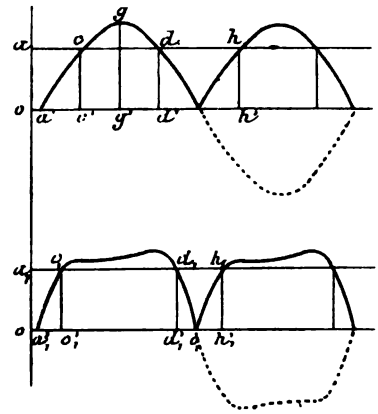


Fig. 258

Comme le commutateur a autant de touches que le moteur de pôles, on voit que l'on recueillera en R et S un courant redressé. Si les touches étaient séparées par un intervalle très faible, ou si les balais étaient calés de manière à rendre le moment de rupture des contacts, très court, on recueillerait un courant redressé, ayant la forme indiquée par la courbe supérieure de la figure 258.

Si la f. e. m. de la batterie est représentée par la droite *ah*, on voit que si l'on avait le contact pendant presque tout le temps, la batterie se déchargerait dans le circuit monophasé pendant les intervalles *a' c'*, *d' h'* etc.

Pour obvier à cet inconvénient, les touches du commutateur sont espacées les unes des autres et pour régler l'espace de temps pendant lequel le circuit monophasé est ouvert, on n'a qu'à déplacer les balais.

On détermine pratiquement cet intervalle en déplaçant les balais jusqu'à ce qu'il ne se produise plus d'étincelle, car au moment voulu les f. e. m. doivent être égales.

Lorsque la courbe de la f. e. m. est une sinusoïde, on voit que les

Digitized by Google

intervalles d'ouverture des circuits sont relativement longs, de plus, la f. e. m. varie beaucoup dans les intervalles de charge, (de c' c à g' g) ce qui est mauvais pour la conservation des accumulateurs.

M. Pollak a remédié à cet inconvénient en transformant la courbe de l'alternateur, en faisant passer le courant dans un transformateur, dont le circuit magnétique est presque saturé. On obtient ainsi une courbe représentée à la partie inférieure de la figure 258. On voit facilement que les intervalles de circuits ouverts sont moins longs et que la variation de f. e. m. est moindre que dans le cas d'une courbe sinusoïdale.

Dans ce genre de courbes il peut arriver que la partie $d'_1 o_1$ ne soit pas égale à la partie $o_1 h'_1$, c'est à cause de celà que les balais sont géminés, on peut alors régler exactement les intervalles d'ouverture des circuits.

Dans l'appareil que M. Pollak a employé pour faire ses expériences, le commutateur en forme de bague portait 8 segments et 8 paires de balais, les balais similaires tels que d et f étaient déplacés simultanément au moyen d'une couronne et d'un levier.

Un alternateur Siemens fournissait le courant au moteur qui faisait 300 tours. Le courant redressé était emprunté au circuit secondaire d'un petit transformateur à noyau saturé, dont le rapport de transformation était 1, le circuit primaire étant parcouru par le courant de l'alternateur.

La batterie d'accumulateurs comportait 24 bacs et avait une capacité de 500 $a.\ h.$, un double commutateur permettait d'inverser le courant redressé, afin que sa f. e. m. ne soit pas en opposition avec celle de la batterie, ce que l'on reconnaissait au moyen de lampes à incandescence.

Dans le circuit primaire du transformateur on avait 62 v. et 50 a. dans le circuit de charge des accumulateurs, on avait 60 v. et 40 a., le moteur synchrone absorbait 100 watts.

§ 4. — TRANSFORMATION DU COURANT CONTINU EN COURANTS POLYPHASÉS ET TRANSFORMATION INVERSE.

Transformateur de MM. Hutin et Leblanc (panchahuteur).

Digitized by Google

Nous avons donné dans le premier volume (page 213) la théorie de ces appareils destinés à transformer à l'usine génératrice, le courant continu en courants polyphasés et à l'usine réceptrice, les courants polyphasés en courant continu.

Les premiers essais ont eu lieu entre la Chapelle et Epinay (1).

A la station génératrice de La Chapelle, était installée une machine à courant continu de 100 a. 160 v.

L'appareil de transformation du courant continu en courants triphasés, était constitué, comme l'indique le schéma de la figure 259 et la vue de la figure 260.

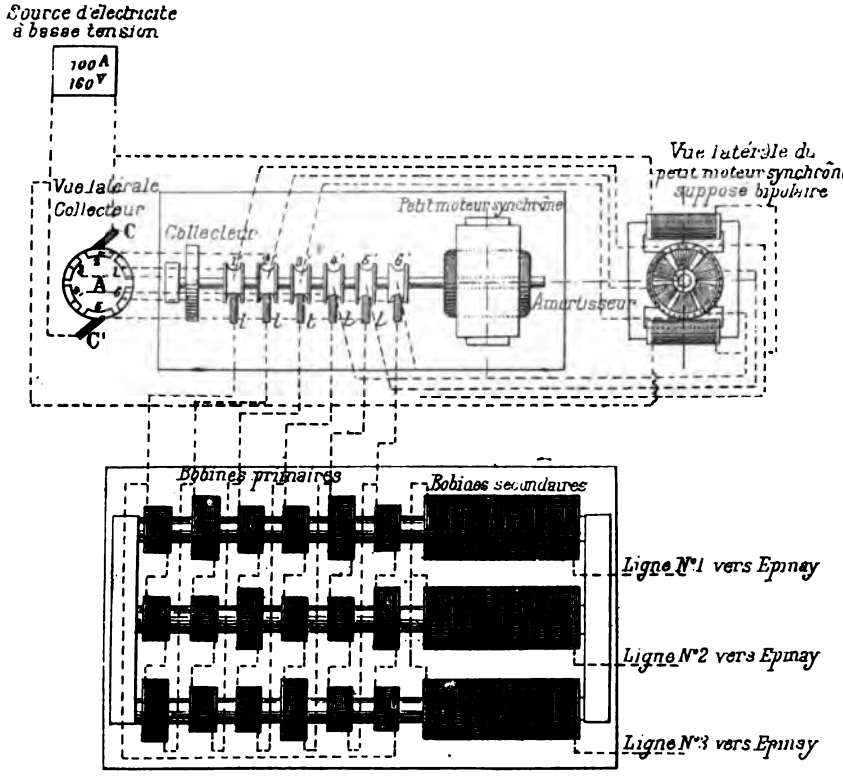


Fig. 259

Un petit moteur synchrone (représenté pour plus de simplicité sur le schéma, comme étant bipolaire), entraîne un arbre sur lequel sont montés 1° un collecteur A, portant autant de touches, qu'il y a

1. D'après un article de M. E. Sartiaux, paru dans le *Bulletin de l'association amicale des Ingénieurs électriciens* année 1894, n° 2.

Digitized by Google

de bobines primaires sur chacun des noyaux (en réalité les noyaux de l'appareil de La Chapelle comportent chacun 18 bobines primaires, mais MM. Hutin et Leblanc ont reconnu que 6 bobines suffisaient et les nouveaux appareils sont montés avec ce nombre de bobines).

Comme pour une fréquence un peu élevée, le moteur synchrone bipolaire aurait une vitesse trop considérable, on emploie ordinairement un moteur multipolaire, si ce moteur à 2 p. pôles, le collecteur comporte n p. touches, n étant le nombre de bobines primaires de chaque noyau.

L'arbre du moteur porte également six bagues isolées mises en relation respectivement, chacune avec une des touches du collecteur (ou avec p. des touches dans le cas ou le moteur a $2p$. pôles).

L'excitation du moteur est empruntée à une dérivation du courant continu. Le moteur est muni d'un amortisseur (voir page 126) assurant le synchronisme.

Fig. 260

Quand le moteur tourne à la vitesse de N tours par minute les circuits des bobines secondaires (montés en étoile) sont parcourus par des courants décalés de $\frac{2\pi}{3}$, ayant une fréquence $F = p. \frac{N}{60}$, si le moteur à $2p$. pôles.

Digitized by Google

A la station d'Epinay, le montage est tout à fait analogue, le courant recueilli au collecteur, sert à charger des accumulateurs; et une dérivation de ce courant sert à l'excitation du moteur synchrone.

On règle l'intensité des courants d'excitation des moteurs synchrones de manière à ce qu'il n'y ait pas de décalages (voir page 126) soit dans les 6 circuits primaires à La Chapelle, soit dans les 6 circuits secondaires à Epinay, de sorte qu'il n'y a pas d'étincelles aux collecteurs. La ligne qui relie les deux postes est constituée par trois fils, dont deux câbles, de sept fils de 9/10 et un câble de trois fils 15/10, la distance est d'environ 8 kilomètres

A la station d'Epinay, le transformateur est employé à la charge d'une batterie d'accumulateur de 64 éléments à neuf plaques $\frac{200}{200}$ de 18 kilogrammes par élément. Cette batterie assure l'éclairage de la station d'Epinay, qui comporte 60 lampes à incandescence de dix bougies.

La fréquence est d'environ 55 (on avait prévu une fréquence de 80 à 100, mais pour les appareils employés le rendement est maximum pour la fréquence 55, que l'on a employée). La haute tension en ligne (par rapport à la terre) variait de 4.300 à 4.975 v. l'intensité maximum du courant a été de 1,96 a.

On a procédé aux essais au mois de février 1894, le tableau de la page 302 en donne les résultats.

Les k. w. fournis et obtenus ont été mesurés au moyen de compteurs Aaron, soigneusement étalonnés (donnant des erreurs de moins de 1 %.

On voit que le rendement augmente avec la puissance transmise, et qu'il a atteint 85,6 %).

Si la machine à vapeur avait été assez forte pour que l'on ait pu obtenir la puissance normale (160 v. 100 a, soit 16 k. w. par heure) le rendement aurait atteint une valeur plus élevée.

Digitized by Google

DATES	DURÉE d'essai	RÉGIME MOYEN de la basse tension à La Chapelle		KILO-WATTS fournis par La Chapelle	KILO-WATTS recueillis à Epinay	RENDE-MENT brut	RENDE-MENT net (déduction des excitations).	OBSERVATIONS
15 février . .	2 h.	160v	52a	16.4	12.8	80 %	75.4 %	L'excitation du moteur de La Chapelle absorbe 0,085 kilowatt L'excitation du moteur d'Epinay est plus coûteuse, elle absorbe 0,236 kilowatt. Les rendements bruts sont donnés par le rapport des kilowatts recueillis en basse tension continue à Epinay, aux kilowatts basse tension continue fournis à La Chapelle. Les rendements nets sont égaux aux rendements bruts diminués de la part qui revient aux excitations du moteur Leblanc, tant à La Chapelle qu'à Epinay Le potentiel dans la ligne de transport a varié entre 4,800 et 5,500 volts et l'intensité entre 0,80 et 1,5 a.
— . .	3	170	52	26.9	22 3	82	79	
16 — . .	2	155	47	16.5	12.7	79	74 1	
— . .	3	200	60	28 3	23.6	82.3	80.6	
17 — .	3	150	54	13 9	11.8	85	80.5	
— . .	2	180	54	9.8	8.1	81.5	76.3	
19 — . .	2	160	67	19 6	17	86.7	82.4	
20 — . .	2	155	60	15 87	12.7	84	80.6	
— . .	4	200	60	33.5	30	89	85.2	
21 — . .	1 1/2	155	57	11.5	10.01	87	79.6	
— . .	3	198	57	28.3	24.07	84.7	83.1	
22 — . .	2	170	56	26.8	23.3	85	82	
23 — . .	2	165	50	24.2	19 5	81	78.5	

Digitized by Google

§ 5. — TRANSFORMATION DU COURANT MONOPHASÉ EN COURANTS POLYPHASÉS.

Nous avons examiné, dans le premier volume (page 173) les divers moyens de transformer un courant monophasé en courant biphasé en voici l'énumération.

1° Au moyen de deux dérivations du courant. Dans le système *Tesla*, les constantes de temps sont très différentes, ce qui est obtenu au moyen de s. i. Dans le système *Hutin* et *Leblanc*, le décalage est obtenu au moyen de condensateurs.

2° L'un des circuits est celui dans lequel agit le courant monophasé l'autre un circuit induit (système *Ferraris*).

3° Le courant monophasé, alimente un transformateur ayant deux circuits secondaires, fournissant les courants biphasés.

4° Au moyen d'un condensateur transformateur.

L'appareil de *M. Désiré Korda* (1) permet de transformer le courant monophasé en courant triphasé. Il se compose en principe d'un transformateur à trois noyaux T_1, T_2, T_3 (fig. 261) et d'une bobine à coefficient de s. i. variable.

Le circuit du courant monophasé est bifurqué entre A et B, les deux branches ont même résistance ohmique R; supposons que dans la branche (2) on place une bobine dont le coefficient de s. i. répond à la condition.

$$\frac{k\,L}{R} = \sqrt{3} = \operatorname{tg} 60°$$

La valeur instantanée de l'intensité du courant dans la branche (1) étant :

$$i_1 = \frac{E}{R} \sin kt$$

celle de l'intensité dans la branche (2) sera :

$$i_2 = \frac{E}{\sqrt{R^2 + k^2 L^2}} \sin (kt - \varphi) = \frac{E}{2R} \sin (kt - 60°)$$

1. *Comptes-Rendus* de l'Académie des sciences du 2 juillet 1894.

Digitized by Google

En enroulant la branche (2) n fois sur le noyau T_2 et la branche (1) $\frac{n}{2}$ fois en sens inverse sur le noyau T_1, on aura deux flux magnétiques.

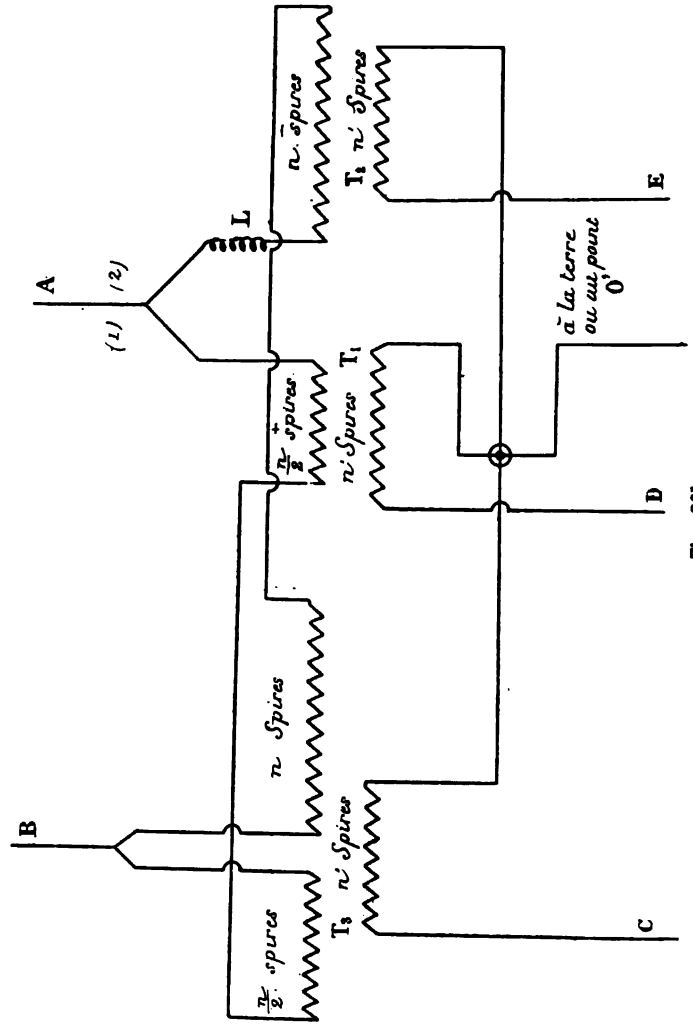


Fig. 261.

Celui du noyaux T_1 pourra être représenté par :

$$\Phi_1 = \Phi_0 \sin kt$$

et celui du noyau T_2 par.

$$\Phi_2 = -\Phi_0 \sin (kt - 60^\circ) = \Phi_0 \sin (kt - 240^\circ)$$

Digitized by Google

En enroulant sur le troisième noyau T_3, n fois la branche (2) et $\frac{n}{2}$ fois la branche (1), mais en sens inverse des enroulements des noyaux T_1 et T_2, le flux dans le noyau T_3, pourra être représenté par :

$$\Phi_3 = -\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_0 \left\{ \sin(kt - 60°) - \sin kt \right\} = \Phi_0 \sin (kt - 120°)$$

On a donc trois flux de même intensité maximum, décalés d'un tiers de période. En munissant chacun des noyaux d'une bobine secondaire, on recueillera des courants triphasés. On pourra réunir les origines de ces circuits secondaires en O, qui sera le centre de l'étoile. Si on relie le point O, au point symétrique O' ou à la terre (O' y étant alors également relié) tant que la condition $\frac{kL}{R} = \sqrt{3}$ sera remplie, aucun courant ne circulera dans ce fil.

Tant que l'appareil fonctionne à pleine charge, la transformation a lieu d'une manière normale et les décalages des courants sont bien les décalages théoriques. Dès que la charge diminue, il n'en est plus ainsi, les décalages s'écartent beaucoup des décalages théoriques, de sorte que l'on obtient ensuite des champs tournants elliptiques.

§ 6. — TRANSFORMATION DU COURANT TRIPHASÉ EN COURANT BIPHASÉ ET TRANSFORMATION RÉCIPROQUE.

L'appareil permettant cette transformation est dû à M. Scott, qui l'a décrit dans une conférence faite à la « National electric light association » de Washington.

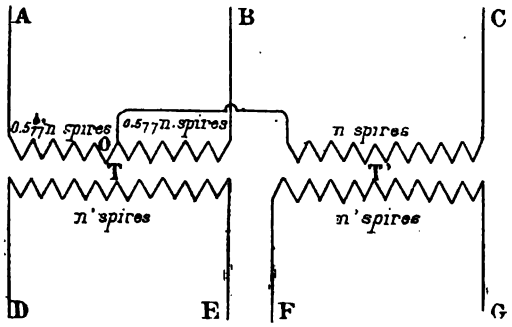


Fig. 262

La figure 262 indique le principe de cet appareil, qui est constitué par deux transformateurs T et T'.

Digitized by Google

Les circuits triphasés sont montés en étoile dont le point O est le centre, on recueille dans les deux circuits D E et F G deux courants décalés de $\frac{\pi}{2}$.

La démonstration peut se faire de la manière suivante :

Le flux dans le transformateur T' peut être exprimé par la relation.

$$\Phi' = \Phi_o \sin\left(kt + \frac{4\pi}{3}\right)$$

Le transformateur T ayant pour chacun des courants 0,577 *n.* spires, au lieu de *n.* dans T', le flux pourra y être représenté par la relation :

$$\Phi = 0{,}577\ \Phi_o \left\{ \sin\left(kt + \frac{2\pi}{3}\right) - \sin kt \right\} = X \sin(kt + \varphi)$$

$$X \sin \varphi = 0{,}577\ \Phi_o \sin \frac{2\pi}{3} = 0{,}50\ \Phi_o$$

$$X \cos \varphi = 0{,}577\ \Phi_o \left(\cos \frac{2\pi}{3} - 1\right) = -\,0{,}865\ \Phi_o$$

$$X^2 = \left\{ \overline{0{,}50}^2 + \overline{0{,}865}^2 \right\} \Phi^2{}_o = \Phi^2{}_o$$

$$X = \Phi_o$$

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{0{,}50}{0{,}865} = -\,0{,}577$$

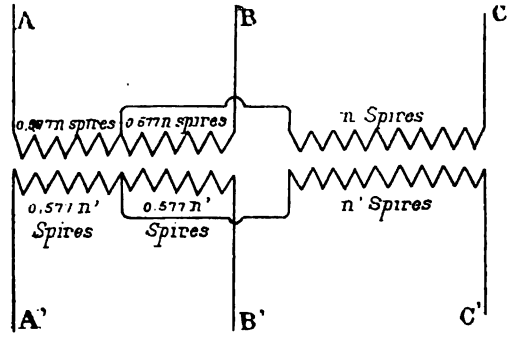


Fig. 263

Comme le sinus est positif et le cosinus négatif, on a :

$$\varphi = 150° = \frac{5\pi}{6}$$

On aura donc :

$$\Phi = X \sin(kt + \varphi) = \Phi_o \sin\left(kt + \frac{5\pi}{6}\right)$$

Digitized by Google

Les deux flux ont même puissance maximum et le décalage est :

$$\frac{4\pi}{3} - \frac{5\pi}{6} = \frac{8\pi}{6} - \frac{5\pi}{6} = \frac{3\pi}{6} = \frac{\pi}{2}$$

Les courants secondaires seront donc décalés de $\frac{\pi}{2}$, c'est-à-dire qu'on recueille bien un courant biphasé.

La transformation réciproque du courant biphasé en courant triphasé, peut se démontrer de la même manière.

Le système peut également servir de transformateur de tension pour courant triphasé, comme l'indique la figure 263.

Digitized by Google

CHAPITRE VI

Canalisations de distribution.

§ 1er — RÉSISTANCE EFFECTIVE DES CONDUCTEURS DE SECTION CIRCULAIRE

Dans le premier volume, nous avons donné (pages 36 et 38) deux tables indiquant l'augmentation de résistance des conducteurs de section circulaire, pour les courants alternatifs.

Si R_A est la résistance d'un conducteur en cuivre à un courant alternatif, c'est-à-dire sa résistance effective, R_C sa résistance ohmique c'est-à-dire celle pour un courant continu, d son diamètre en c. m., N le nombre de périodes du courant, on a avec une approximation bien suffisante pour les besoins de la pratique.

$$R_A = R_C \ (1 + 7{,}5\ d^4\ N^2\ 10^{-7})$$

L'augmentation de résistance est donc proportionnelle à la quatrième puissance du diamètre et au carré du nombre de périodes par seconde.

M. Hospitalier (1) a calculé les éléments d'une table simple et condensée, qui peut s'appliquer à tous les diamètres de fils, pour toutes les fréquences et pour des résistances différentes du métal employé.

$$R_A = K\ R_c$$

Il résulte d'une étude de lord Kelvin (sir W. Thomson) que pour un fil d'une substance donnée, K est proportionnel au produit du carré du diamètre par la fréquence $\left[d^2\left(\frac{1}{T}\right)\right]$.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de K, pour du cuivre dont la résistance est de 1.597 unités C. G. S. pour les diverses valeurs de $d^2\left(\frac{1}{T}\right)$, d étant exprimé en centimètres et $\frac{1}{T}$ étant la fréquence par seconde.

1. *L'Industrie électrique*, numéro 48 du 25 décembre 1893.

Digitized by Google

$\frac{d^2}{T}$	K	$\frac{d^2}{T}$	K	$\frac{d^2}{T}$	K
0	1.0000	720	1.3180	2880	2 3937
20	1.0000	980	1.4920	5120	3.0956
80	1.0001	1280	1.6778	8000	3.7940
180	1.0258	1620	1.8628	18000	5.5732
320	1.0805	2000	2.0480	32000	7.3250
500	1.1747	2420	2.2190		

Il suffira donc pour trouver la résistance effective d'un fil donné de calculer la valeur du produit $\frac{d^2}{T}$ et de chercher la valeur correspondante de K dans la table (on interpolera au besoin).

Si la résistivité du métal employé n'est pas égale à 1.597 unités C. G. S. et si sa perméabilité magnétique est égale à l'unité (ce qui exclut le fer, l'acier, le nickel, etc.) le facteur $\frac{d^2}{T}$ sera à multiplier par $\frac{1597,}{S}$ S étant la résistivité du métal, en unités C. G. S.

Lorsque le facteur $\frac{d^2}{T}$ dépasse 32.000, on obtient la résistance effective avec une précision suffisante, en calculant la résistance du conducteur plein, comme égale à celle du conducteur tubulaire de même diamètre extérieur dont l'épaisseur serait égale à :

$$6{,}38\sqrt{T} \text{ c. m.}$$

§ 2. — INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE ET REFROIDISSEMENT.

La résistance ohmique du cuivre augmente avec la température. Pour des températures moyennes, on peut admettre que si R est la résistance à $t°$, la résistance R_1 à $t_1{}^0$ est :

$$R_1 = R\ (1{,}00388)^{t_1 - t}$$

Le tableau suivant donne le coefficient d'augmentation de résistance du cuivre pour des températures croissant de 5 en 5 degrés.

Digitized by Google

DIFFÉRENCE de température	COEFFICIENT	DIFFÉRENCE de température	COEFFICIENT	DIFFÉRENCE de température	COEFFICIENT
5	1.0196	35	1.1453	60	1.2616
10	1.0395	40	1.1636	65	1.2863
15	1.0598	45	1.1904	70	1.3114
20	1.0806	50	1.2137	75	1.3371
25	1.1017	55	1.2374	80	1.3663
30	1.1232				

Un fil de cuivre pur écroui, de 1 millimètre de diamètre et de 1 mètre de longueur a une résistance de 0,02034 ohm à 0° (étalon de Matthiessen).

Le cuivre ordinairement employé pour les conducteurs électriques, a une conductibilité de 98 % de celle de l'étalon, de sorte que la résistance à 0° d'un fil de 1 millimètre de diamètre et de 1 mètre de longueur est :

$$r = 0{,}02034 \frac{100}{98} = 0{,}02075 \text{ ohm.}$$

La résistance à 0°, d'un fil de d millimètres de diamètre et de 1 mètre de longueur sera :

$$r = \frac{0{,}02075}{d^2}$$

et celle d'un fil de s millimètres carrés de section, puisque $\frac{\pi d^2}{4} = s$

$$r = \frac{0{,}01629}{s}$$

La résistance à 0° d'un fil de l mètres de longueur est :

$$R = \frac{0{,}02075}{d^2} l = \frac{0{,}01629}{s} l$$

à 27° la résistance est :

$$R = \frac{0{,}023\, l}{d^2} = \frac{0{,}018}{s} l$$

et à 35° :

$$R = \frac{0{,}0238\, l}{d^2} = \frac{0{,}0187\, l}{s}$$

Digitized by Google

en pratique on prendra généralement pour les fils conducteurs :

$$R = \frac{0{,}022}{d^2} l \quad \text{et} \quad R = \frac{0{,}018}{s} l$$

et pour les fils des bobines des appareils :

$$R = \frac{0{,}025}{d^2} l \text{ et } R = \frac{0{,}02}{s} l$$

(Il ne faut pas oublier en appliquant ces formules que R est exprimé en ohms, l en mètres, d en m. m. et s en m. m.^{2}).

Les sections des différents conducteurs sont déterminées, comme nous le verrons plus loin, soit par la considération d'économie d'exploitation (voir le chapitre VII *Stations centrales*), soit par la considération d'une perte de charge à ne pas dépasser. Quand la section d'un conducteur est ainsi déterminée, il faut vérifier si elle n'est pas trop faible, c'est-à-dire si sa résistance n'est pas trop grande, car sans cela le métal pourrait atteindre une température trop élevée, ce qui causerait le double inconvénient : 1° d'augmenter considérablement sa résistance, 2° de diminuer celle de l'isolant.

En effet le travail perdu par suite de la résistance R d'un conducteur est R I^2, I étant l'intensité efficace du courant, ce travail est transformé en chaleur et si le fil ne se refroidissait pas, il ne tarderait pas à fondre même avec une intensité efficace très faible.

Le refroidissement a lieu par *conductibilité*, par *rayonnement* et par *convexion*.

Comme la perte de chaleur par refroidissement, augmente avec la température d'un corps, il est évident qu'un conducteur parcouru par un courant d'intensité efficace donnée et placé dans des conditions déterminées, atteindra au bout d'un certain temps une température fixe.

Afin que les isolants n'aient pas à souffrir, il faut que cette température ne dépasse pas une certaine limite. Le comité de « l'Institution of electrical engeoners » a indiqué la règle pratique suivante :

« La température d'un conducteur parcouru par un courant d'intensité efficace double de l'intensité efficace normale ne doit pas dépasser 65°. »

Comme l'élévation de température varie à peu de chose près proportionnellement au carré de l'intensité efficace et que l'on peut

Digitized by Google

admettre comme température extérieure 25°, cette règle revient à ne permettre dans le conducteur parcouru par le courant normal, qu'une élévation de température de 10°.

Il y a donc intérêt à pouvoir déterminer à l'avance la température d'un conducteur placé dans des conditions données ; malheureusement, on manque de données pratiques, les seules expériences concluantes sont celles exécutées par M. Kennelly en 1889, qui ont porté sur le refroidissement 1° des conducteurs isolés placés dans des moulures ou gaines en bois, 2° des fils nus placés dans l'intérieur des maisons, 3° des fils nus placés en plein air.

Les conducteurs isolés placés dans des gaines en bois se refroidissent par conductibilité, puis quand la moulure s'est suffisamment échauffée, le rayonnement et la convexion interviennent.

M. Kennelly a trouvé que l'élévation de température varie à peu près proportionnellement au carré de l'intensité du courant pour un fil donné et que pour une élévation de température donnée, le carré du courant varie dans la même proportion que le cube du diamètre du fil.

M. Kennelly a indiqué la formule suivante pour un fil de d millimètres de diamètre, parcouru par un courant d'intensité efficace de I ampère, dans le cas d'application de la règle de l'Institution of electrical Engeeners.

$$d = 0{,}374 \sqrt[3]{I^2} \qquad d^3 = 0{,}0523\ I^2$$
$$I = 4{,}375 \sqrt{d^3}$$

Nous avons vu plus haut que le cuivre ordinairement employé a, à la température de 35° (25° + 10°) une résistance $R = \frac{0{,}0238}{d^2}$ par mètre courant.

Si on introduit R dans la formule, on aura :

$$d^3 = 0{,}0523\ I^2\ R\ \frac{d^2}{0{,}0238}$$

ou :

$$d \geqslant 2{,}20\ R\ I^2$$

formule que l'on pourra utiliser dans le cas où la résistance effective du métal serait différente de celle du cuivre ordinairement employé,

Digitized by Google

soit par suite de la résistance spécifique, soit par suite de l'emploi du courant alternatif.

Dans le cas où le conducteur est un câble, d représente le diamètre extérieur en millimètres et R la résistance totale par mètre linéaire.

La surface extérieure du câble est par mètre de longueur :

$$S_e = 1000 \pi d$$

On aura donc d'après la formule précédente :

$$S_e = 1000 \pi 2{,}20 \text{ R } I^2 = 6912 \text{ R } I^2$$

S_e étant exprimé en millimètres carrés.

Si S'_e est la surface extérieure du conducteur par mètre de longueur en centimètres carrés, on aura :

$$S_e' = 69{,}12 \text{ R } I^2$$

R étant la résistance effective par mètre de longueur.

RI^2 représente le nombre de watts perdus par mètre de longueur, la surface extérieure doit donc être de 69,12 centimètres carrés par watt transformé en chaleur.

Il n'y a pas d'expériences relatives au *refroidissement des câbles souterrains* qui a lieu par convexion et conductibilité.

Si le câble est concentrique, RI^2 représente la perte dans le conducteur, aller et retour.

Prenons un câble concentrique du système Ferranti, que nous décrirons plus loin. Il est composé de deux conducteurs tubulaires en cuivre, enfilés l'un dans l'autre avec interposition d'un isolant. Le câble pour un courant d'une intensité efficace de 250 ampères a une résistance de 0,20 ohm par kilomètre (aller et retour), soit 0,0002 ohm par mètre, le travail transformé en chaleur par mètre est donc de :

$$R I^2 = 0{,}0002 \times 250^2 = 12{,}50 \text{ watts}$$

le diamètre extérieur du conducteur extérieur est de 49 millimètres, on a donc $d = 49$, ce qui donne une surface de $100 \times \pi \times 4{,}9 = 1.529$ centimètres carrés par mètre courant.

La surface extérieure par watt perdu est donc de $\frac{1529}{12{,}5} = 122$ centimètres carrés.

Digitized by Google

Si l'on adopte la même valeur pour tous les câbles souterrains, on devra avoir :

$$S_e = 12200\ R\ I^2$$

S_e étant exprimé en millimètres carrés. Comme $S_e = 1000\ \pi\ d$, on devra avoir :

$$d \geqslant 3{,}88\ R\ I^2$$

Les fils nus placés à l'intérieur se refroidissent par rayonnement et convexion. M. Kennelly a trouvé que pour un excès de température du fil de 10 à 15°, sur la température de l'air, le diamètre du conducteur doit réaliser la condition :

$$R\ I^2 \leqslant 0{,}0175\ dt + 0{,}175\ t$$

t étant la différence de température, d le diamètre exprimé en millimètres, R la résistance effective par mètre en ohms et I l'intensité efficace du courant en ampères.

Pour les fils nus placés à l'extérieur, on doit avoir :

$$R\ I^2 \leqslant 0{,}1175\ dt + 0{,}175\ t$$

Dans le cas où le conducteur est constitué par plusieurs fils formant torons, on ne peut prendre comme section totale, la section droite du câble qui est plus grande que la somme des sections droites des fils qui le constituent.

Chaque fil, par suite de la torsion, est plus long qu'il ne le serait si il était tendu.

La longueur du fil, suivant le mode de toronage, varie de 1,05 à 1,28 mètre par mètre de longueur du câble.

Si r est la résistance par mètre de longueur de l'un des n fils constituant le câble, la résistance de ce dernier sera :

$$R = \frac{r\ (1{,}05\ \text{à}\ 1{,}28)}{n}$$

La résistance ohmique du câble est plus grande que celle d'un fil ayant pour section droite n fois de section droite d'un des fils, mais la résistance effective du câble sera ordinairement, d'après ce que nous avons vu précédemment, plus faible que celle du fil unique correspondant.

Digitized by Google

§ 3. — INFLUENCE DE LA CAPACITÉ ET DE LA SELF-INDUCTION.

Les équations relatives à la capacité uniformément répartie dans les câbles sont très compliquées et peu commodes pour le calcul, aussi comme nous l'avons vu (1er volume, page 128) admet-on en pratique que les capacités sont concentrées en des points déterminés.

Dans les câbles à un conducteur avec armature, on suppose que la capacité est remplacée par un condensateur intercalé dans le circuit.

Pratiquement, aucun courant ne circule dans les câbles à un conducteur (aller et retour) quand le circuit est interrompu à l'une de ses extrémités.

Quand le circuit est fermé, la capacité entre en jeu et peut annuler les effets de la s. i. des alternateurs et des transformateurs, ou produire des phénomènes d'élévation de potentiel, comme nous l'avons étudié (1er volume, page 48 et suivantes).

Les câbles concentriques peuvent être assimilés à un circuit dans lequel est intercalé un *condensateur transformateur* (1er volume, page 77).

Le condensateur transformateur a une capacité c égale à la capacité totale entre les conducteurs intérieur et extérieur du câble.

Si R est la résistance effective du câble, L le coefficient de s. i. de la portion du côté de la source, c' la capacité totale du câble entre le conducteur extérieur et l'armature, r et l la résistance effective et le coefficient de s. i. de la portion du circuit à la sortie du câble (circuit d'utilisation), on a, en désignant par I l'intensité maximum du courant circulant dans le câble :

$$\frac{I^2}{X^2} = k^2c^2r^2 + (k^2cl - 1)^2 \qquad (1^{er} \text{ volume, page 178})$$

L'intensité maximum X, du courant circulant dans le circuit d'utilisation, sera, suivant les valeurs relatives de k, c, r, l, plus petite ou plus grande que celle du courant circulant dans le câble. Comme nous l'avons vu, la capacité en farads, par centimètre de longueur de câble, est donnée par la relation :

$$c = \frac{K}{18 \times 10^{11} \log_n \frac{r_2}{r_1}}$$

Digitized by Google

r_2 et r_1 étant respectivement dans un câble à un conducteur, le rayon intérieur de l'armature et le rayon extérieur du conducteur.

Dans un câble concentrique, pour avoir la capacité entre le conducteur intérieur et le conducteur extérieur, il faut prendre pour r_2 le rayon intérieur du conducteur extérieur, et pour r_1, le rayon extérieur du conducteur intérieur.

La capacité d'un câble est en farads :

$$c = \frac{100\,K\,l}{18 \times 10^{11} \log_n \frac{r_2}{r_1}} = \frac{K\,l}{18 \times 10^9 \log_n \frac{r_2}{r_1}}$$

l étant la longueur du câble en mètres, comme :

$$\log_n \frac{r_2}{r_1} = 2{,}30 \log \frac{r_2}{r_1}$$

on aura :

$$c = \frac{K\,l}{41{,}40 \times 10^9 \log \frac{r_2}{r_1}} \text{ (en farads)}$$

$$c = \frac{K\,l}{41{,}40 \times 10^3 \log \frac{r_2}{r_1}} \text{ (en microfarads)}$$

K est la capacité inductive spécifique de l'isolant du câble ; ce coefficient est souvent différent de celui obtenu pour un courant continu.

MM. Salford et Halmann indiquent les valeurs suivantes pour K, dans le cas d'un courant alternatif (*Formulaire pratique de l'Électricien* de M. Hospitalier) :

Pétrole (câbles Brooks)	K = 1,6
Caoutchouc	3,7
Paraffine solide	2,0
Coton saturé de paraffine dans le vide . . .	2,0
Coton saturé de paraffine bouillante (câbles Paterson)	2,6
Gutta-percha artificielle (Gwin)	4,2
Verre	4,6

Les câbles Ferranti pour 250 ampères ont un conducteur intérieur de 2,06 c. m. de diamètre extérieur, et un conducteur extérieur de 4,68 c. m. de diamètre intérieur ; leur capacité est de 0,180 microfarad par kilomètre (0,31 par mille anglais).

La formule ci-dessus permet de déduire la capacité inductive de l'isolant qui est du papier imprégné de cire.

Digitized by Google

On a :

$$K = \frac{41{,}40 \times 10^8 \log \frac{r_2}{r_1}\, c}{l}$$

$$\log \frac{r_2}{r_1} = \log \frac{2{,}34}{1{,}08} = 0{,}356 \qquad c = 0{,}18 \qquad l = 1000 \qquad K = 2{,}65$$

On a procédé à l'usine de Deptford, à Londres, sur les câbles Ferranti, à des expériences relatives à l'influence de la capacité des câbles, dont nous donnons ci-après un résumé d'après M. Fleming (1). Comme dans le système Ferranti, le conducteur extérieur est mis à la terre; la capacité entre ce conducteur et la terre n'intervient pas. Il n'y a, outre la capacité entre les deux conducteurs, à ne considérer que la capacité entre le conducteur intérieur et la terre.

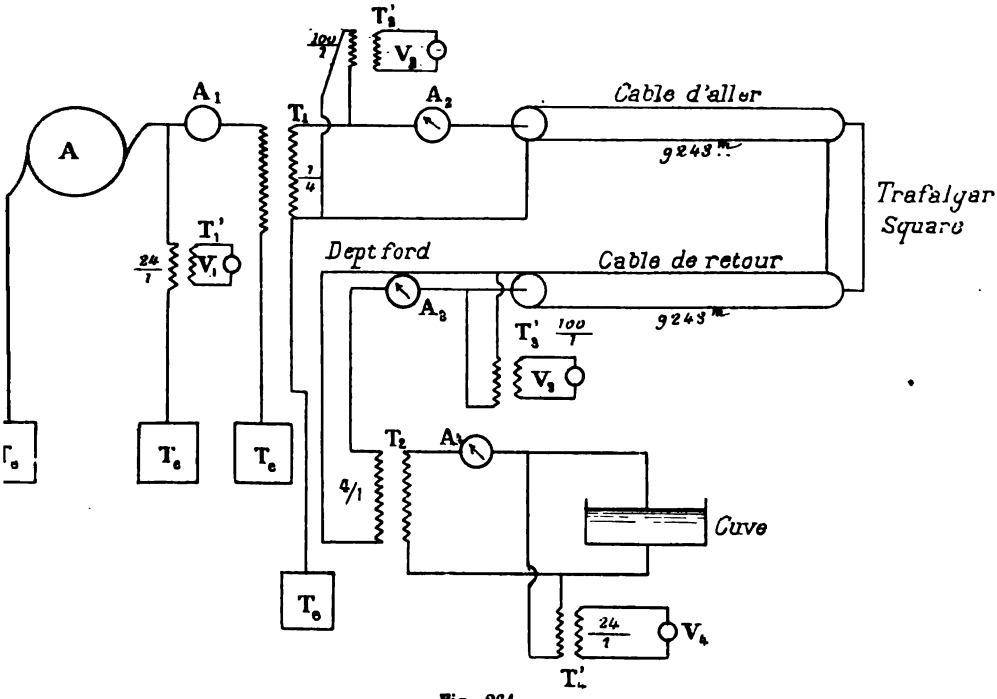


Fig. 264.

Le schéma de la figure 264 indique la manière dont les appareils étaient installés.

A l'usine de Deptford, l'alternateur A avait une tension efficace de

1. *The alternate current transformer* (2e volume, page 401 et suivantes).

Digitized by Google

2.500 volts et un transformateur T_1 élevait cette tension à 10.000 volts. Le courant du secondaire de ce transformateur était conduit par un câble concentrique à Trafalgar square et un second câble servait au retour à Deptford.

En T_2, était un transformateur avec rapport de transformation de 4 à 1, qui ramenait la tension à 2.500 volts. Dans le secondaire de ce transformateur, était intercalée une résistance liquide permettant d'absorber l'énergie produite.

Des ampèremètres Evershed A_1, A_2, A_3, A_4 permettaient de mesurer les intensités efficaces : 1° A_1 aux bornes de l'alternateur; 2° A_2 à l'origine des câbles; 3° A_3 à l'extrémité des câbles; 4° A_4 dans le circuit de la résistance liquide.

Des voltmètres Cardew, V_1, V_2, V_3, V_4, montés sur des circuits alimentés par des transformateurs réducteurs, abaissant le voltage à environ 100 volts, permettaient de mesurer la différence de potentiel aux divers points.

Les quatre points où l'on mesurait l'intensité et le voltage, étant tous situés dans l'usine de Deptford, les observateurs prenaient les mesures simultanément, prévenus par un coup de sifflet.

Quand le circuit, dans lequel était intercalée la résistance liquide était ouvert, un courant circulait quand même dans les câbles. En faisant varier la longueur de ces derniers, on faisait varier proportionnellement l'intensité efficace du courant. Ce courant, était le *courant de condensateur* du câble; il était normalement de 1,2 à 1,3 ampère par mille anglais de câble (0,74 à 0,81 ampère par kilomètre). La f. e. m. dans le secondaire du transformateur T_1 était la f. e. m. appliquée E_a, R étant la résistance du câble et c la capacité; l'intensité efficace du courant est donnée par la relation :

$$I_{eff} = \frac{E_{a\ eff}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{k^2 c^2}}}$$

Comme R résistance du câble est très faible, on peut négliger R^2, et on a :

$$I_{eff} = kc\ E_{a\ eff}$$

Si c est exprimé en microfarads, I_{eff} en ampères et $E_{a\,eff}$ en volts, on a :

$$I_{eff} = kc.\ E_{a\ eff}\ 10^{-6}$$

Digitized by Google

d'où :

$$c = \frac{I_{eff}}{k\, E_{a\ eff}}\, 10^6$$

Cette formule permet donc de calculer la capacité, étant donnée l'intensité efficace du courant de condensateur.

Le tableau suivant indique les f. e. m. efficaces appliquées aux bornes du secondaire du transformateur T, l'intensité efficace du courant de condensateur et la capacité calculée d'après la formule précédente.

DIFFÉRENCE de potentiel efficace volts	INTENSITÉ efficace du courant de condensateur ampères	CAPACITÉ calculée d'après la formule en microfarads	NOMBRE de câbles placés dans le circuit
8150	8	1.9	1
9050	20	4.2	2
9900	31	6.0	3
10850	44	7 7	4

Chacun des deux premiers câbles avait une longueur de 10621 mètres, chacun des deux autres 9350 mètres.

La longueur totale était donc de 39942 mètres, soit 40 kilomètres, et la capacité d'environ 0,18 microfarad par kilomètre, ce qui correspond exactement à la valeur trouvée dans des expériences au moyen du galvanomètre balistique.

D'autres faits ont été constatés dans ces expériences. Le circuit secondaire du transformateur T_1, n'étant pas relié aux câbles, on a fait varier l'intensité du courant d'excitation de l'alternateur, en maintenant sa vitesse constante. On a obtenu les resultats indiqués au tableau suivant :

Digitized by Google

NOMBRE de tours par minute	INTENSITÉ du courant d'excitation	VOLTAGE aux bornes de l'alternateur	VOLTAGE aux bornes du secondaire du transformateur	RAPPORT de transformation
52	98	2633	10650	4.04
52	82	2345	9400	4.05
52	72	2105	8450	4.01
52	65	1961	7800	4.03
52	55	1661	6700	4.03

On a ensuite relié aux bornes du secondaire du transformateur, les câbles avec leur extrémité isolée et on a obtenu les résultats indiqués ci-dessous :

NOMBRE de tours par minute	INTENSITÉ du courant d'excitation ampères	VOLTAGE aux bornes de l'alternateur volts	VOLTAGE aux bornes secondaires du transformateur	RAPPORTS de transformation (1)	NOMBRE de câbles reliés au secondaire du transformateur
52	62	1875	7500	4.00	0
52	62	2012	8150	4.05	1
52	62	2153	9050	4.2	2
52	62	2421	9900	4.1 (?)	3
52	62	2489	10850	4.4	4

Le courant dans les câbles, quand ils étaient reliés aux bornes, avait respectivement des intensités efficaces de 8, 20, 31 et 44 ampères, suivant que 1, 2, 3 ou 4 câbles étaient reliés au secondaire du transformateur. La fréquence était de 83 alternances à la seconde.

Ces expériences montrent que, quand il y a de la capacité dans le circuit du secondaire d'un transformateur, le voltage aux bornes

1. Avec un petit transformateur à noyau droit, M. Sahulka a obtenu par l'introduction d'un condensateur de 5 microfarads une augmentation de 18 °/o du rapport de transformation.

Digitized by Google

de l'alternateur (1), ainsi que le voltage aux bornes du secondaire du transformateur sont accrus, mais que l'accroissement de voltage est proportionnellement moins fort pour l'alternateur, puisque le coefficient de transformation augmente au fur et à mesure que la capacité du secondaire augmente, c'est-à-dire que l'on y ajoute des câbles concentriques.

L'accroissement de voltage aux bornes de l'alternateur peut être dû en partie à une variation de la réaction d'armature, qui diminue par suite de la diminution du décalage du courant par rapport à la f.e.m. appliquée.

Une autre cause est la variation de la résistance apparente totale, équivalente du circuit primaire du transformateur (1er volume, page 90),

Si E_a est la valeur maximum de la f. e. m. appliquée, r_1 la résistance effective du circuit primaire, l_1 son coefficient de s. i., c_1 sa capacité (dans notre cas, $c_1 = o$), r_2 la résistance ohmique du circuit secondaire, l_2 son coefficient de s. i., c_2 sa capacité, M le coefficient d'induction mutuelle, I_1 et I_2 les intensités maxima du courant dans le primaire et dans le secondaire, en posant :

$$\lambda_1 = l_1 - \frac{1}{k^2 c_1} \qquad \lambda_2 = l_2 - \frac{1}{k^2 c_2}$$

Nous avons trouvé (1er volume page 89).

$$I_1^2 = \frac{E_a^2}{r_1^2 + k^2\lambda_1^2 + k^2 M^2 \dfrac{2\, r_1 r_2 + k^2 M^2 - 2\, k^2 \lambda_1 \lambda}{r_2^2 + k^2 \lambda_2^2}}$$

La f. e. m. maximum aux bornes du primaire est $r_1 I_1$ et la f. e. m. efficace mesurée $\frac{r_1 I_1}{\sqrt{2}}$ certaines valeurs de λ_1 et λ_2, peuvent faire croître 1, et par conséquent $r_1 I_1$.

1. Ce phènomène a été désigné sous le nom d'*effet Ferranti*. M. Pickelmayer a trouvé que la condition pour que l'effet Ferranti se produise, est :

$$\sqrt{k^2 R^2 c^2 + (1 - k^2 L^2 c^2)^2} < 1$$

et que l'élévation de tension est maximum lorsque l'on a :

$$c = \frac{L}{R^2 + k^2 L^2}$$

R étant la résistance de l'alternateur, L son coefficient de s. i., et $k = 2\pi F$, la pulsation.

Digitized by Google

L'augmentation du rapport de transformation, peut être expliquée de la manière suivante :

Nous avons trouvé (1er volume page 90).

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\sqrt{r_2^2 + k^2\lambda_2^2}}{k\,M}.$$

Le rapport de transformation est $\frac{r_1 I_1}{r_2 I_2}$ ce rapport peut donc augmenter pour certaines valeurs de r_2 et λ_2.

En exécutant les expériences, on a trouvé que quand le transformateur T_2, avait son secondaire ouvert, le courant de condensation était de 12 à 14 ampères (d'intensité efficace) pour 10.000 volts environ aux bornes du secondaire T_1.

En chargeant le circuit secondaire du transformateur T_2, l'intensité du courant augmente, mais l'intensité mesurée à l'ampèrement A_1 est toujours plus grande que l'intensité mesurée à la sortie des câbles au voltmètre A_2.

On a également trouvé que la racine carrée de la différence des carrés des intensités de ces courants était constante et égale à l'intensité du courant de condensateur.

La capacité par rapport à la terre, d'un *fil aérien* dont le rayon est de r c. m. placé à une distance de d c. m. du sol est par un temps très sec.

$$c = \frac{0{,}0217}{\log_n \frac{2\,d}{r}} \text{ microfarad}$$

elle croît très peu avec le diamètre.

L'intensité du courant de condensation est : (voir page 318).

$$I_{eff} = k\,c\;E_{a\,eff}\,10^{-6}$$

c'est-à-dire insignifiant.

Dans les expériences entreprises par la société d'Oerlikon, sur la ligne de transport de force de Bülach à Oerlikon, on a constaté les effets suivants :

La ligne a une longueur de 23 km. et est constituée par quatre fils

Digitized by Google

de 4 m. m. de diamètre qui sont en moyenne à 10 mètres au-dessus du sol. Dans les expériences à haute tension (25.000 volts) les conducteurs étaient reliés deux par deux à une extrémité de la ligne, de sorte que l'on disposait d'une ligne double de 46 km. de longueur.

La capacité calculée au moyen de la formule donnée ci-dessus était de :

$$c = \frac{46.\ 0{,}0217}{\log_n \frac{2000}{0{,}2}} = 0{,}25 \text{ microfarad}$$

Pour 42 alternances à la seconde et une f. e. m. efficace de 24.000 volts, le courant de condensateur calculé par la formule ci-dessous est :

$$I_{eff} = 2\,\pi\,42.\ 24000.\ 0{,}25.\ 10^{-6} = 1{,}632 \text{ ampère}$$

Les mesures effectuées ont donné comme résultat 1,65 ampère. La dépense en watts, pour ce courant, mesurée par la méthode du dynamomètre de Fleming, a été trouvée de 4.150 watts, y compris la perte de travail pour l'aimantation du transformateur dont le rapport de transformation était de 1 à 150.

Cette ligne pour une perte de tension de 10 %, est en état de permettre le transport de 400 kilowatts à 46 kilomètres, de sorte que la dépense en watts due au courant de condensateur est de 1 % environ, c'est-à-dire insignifiante.

Dans les lignes aériennes c'est donc surtout la s. i. qui joue un grand rôle et qui augmente de beaucoup la résistance apparente.

La résistance apparente est :

$$\sqrt{R^2 + k^2 L^2} = AR \qquad (1^{er} \text{ volume, page 33}).$$

Soient (1) l la longueur d'une ligne aérienne à double conducteur, ($2\,l$ étant la longueur du fil) d la distance des deux conducteurs et r leur rayon, ρ la résistivité, toutes ces quantités étant mesurées en unités C. G. S. on a :

$$L = 2\,l\left(\frac{1}{2} + 2\log_e \frac{d}{r}\right)$$

1. D'après un article de M. Hospitalier, paru dans l'*Industrie électrique* du 10 janvier 1894.

Digitized by Google

$$R = \frac{\rho . 2l}{s} \qquad R^2 = \frac{4\rho^2 l^2}{s^2} = \frac{4\rho^2 l^2}{\pi^2 r^4}$$

Nous aurons donc :

$$A = \sqrt{\frac{R^2 + k^2 L^2}{R^2}}$$

$$A = \sqrt{1 + \pi^2 r^4 \frac{k^2}{\rho^2}\left(2\log_e \frac{d}{r} + \frac{1}{2}\right)^2}$$

M. Kennelly a donné à la quantité A le nom de *facteur d'impédance* c'est le facteur par lequel il faut multiplier, la résistance électrique de la ligne considérée, pour avoir son impédance ou résistance apparente.

Le calcul du facteur d'impédance déduit de la formule ci-dessus est un peu pénible. M. Hospitalier a dressé la table suivante pour la fréquence de 100 périodes ($k = \frac{2\pi}{T} = 628$) et la résistivité de 1688.6 unités C. G. S. à 15°, en vue de l'utiliser par un calcul simple pour d'autres fréquences et d'autres résistivités.

Facteurs d'impédance de deux fils parallèles en cuivre à 15° $\frac{k}{2\pi} = \frac{1}{T} = 100$ *périodes à la seconde,* $\rho = 1688{,}6$ *unités* C. G. S.

DISTANCE axiale des fils en centimètres	DIAMÈTRES DES FILS (2 r) EN MILLIMÈTRES					
	1	2	4	5	8	10
1	»	1,0018	1,015	1,028	1,092	1,142
2	»	1,0027	1,028	1,056	1,218	1,384
4	»	1,004	1,045	1,093	1,383	1,689
5	»	1,005	1,051	1,107	1,432	1,796
10	»	1,007	1,075	1,154	1,638	2,145
20	1,0007	1,009	1,098	1,207	1,844	2,510
50	1,0009	1,011	1,186	1,287	2,208	3,009
100	1,0011	1,014	1,169	1,353	2,373	3,394
200	1,0013	1,017	1,204	1,423	2,617	3,783
500	1,0015	1,021	1,252	1,521	2,929	4,302
1000	1,0018	1,023	1,293	1,599	3,170	4,698
2000	»	1,028	1,337	1,670	3,428	5,093
5000	»	»		1,789	3,755	5,635

Digitized by Google

D'après la formule, on voit que toutes choses égales d'ailleurs, on passe de la fréquenee 100 à une autre fréquence, par les opérations suivantes :

1° Elever le facteur d'impédance A au carré.
2° En retrancher 1.
3° Multiplier le reste par le carré de la nouvelle fréquence.
4° Diviser par 10.000.
5° Ajouter 1.
6° Extraire la racine ce qui donne le nouveau facteur d'impédance.

On passe d'une résistivité à une autre, en observant seulement que le facteur ρ est au dénominateur.

Ces calculs supposent la capacité électrostatique de la ligne nulle ou négligeable, ce qui est le cas des lignes aériennes.

M. Hospitalier a calculé l'impédance d'une ligne double en cuivre, dont les fils sont à 1 m. de distance, ont 1 c. m. de diamètre traversée par des courants alternatifs de 120 périodes à la seconde.

Le facteur d'impédance est 4,01.

Si il s'agit par exemple d'un transport à 10 k. m. ($2l = 20$ k. m.) et d'un courant de 20 ampères, à canaliser, la résistance de la ligne étant de 4 ohms, son impédance sera de 16 ohms. Si la ligne ne présentait pas de s. i. il faudrait pour obtenir 2.000 volts efficaces au bout de la ligne, produire 2.080 volts à l'origine, tandis qu'avec l'impédance il faudra en produire 2.320.

La perte de puissance, en ligne est naturellement R I^2 et non le produit de l'impédance par le carré de l'intensité, R étant la résistance effective.

§ 4. — DE LA PERTE D'ENERGIE DANS LES CABLES ARMÉS.

Dans un câble concentrique, il ne se produit aucune perte d'énergie dans l'armature, car dans chaque conducteur, le courant donne naissance à des lignes de forces circulaires, qui étant de sens contraire se détruisent, de sorte qu'il n'y a aucune induction à l'extérieur.

Digitized by Google

Dans un câble simple armé, il se produit au contraire dans l'armature des courants de Foucault et il y a des pertes par hystérésis. Si cette armature est constituée par un métal magnétique, il y a en outre induction à l'extérieur.

Pour éviter ce dernier effet on peut placer les deux câbles, aller et retour, dans un tuyau en fonte ou en fer. A partir de l'axe de part et d'autre duquel les deux câbles sont placés symétriquement, le tube est parcouru par des lignes de force de sens contraires qui s'annulent, mais il y a des pertes par hystérésis et courants de Foucault qui sont cependant moindres que dans le cas du câble armé isolé, puisque l'on a en somme affaire à deux circuits magnétiques ouverts.

Pour évaluer ces pertes, M. Ch. Jacquin a procédé à des expériences dans les usines de MM. Ménier à Grenelle (1).

Afin d'éviter des erreurs provenant de l'étalonnage des instruments M. Jacquin a mesuré la puissance totale P et la puissance p perdue dans le câble, avec le même wattmètre, en employant la disposition ingénieuse représentée figure 265.

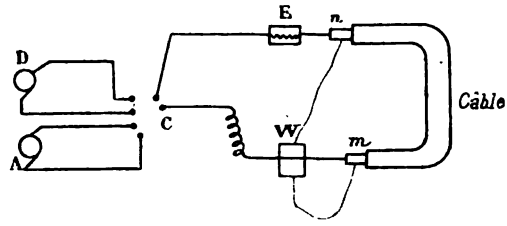


Fig. 265

A représente l'alternateur, D une dynamo à courant continu, un commutateur C permet de mettre en relation le câble avec l'un ou l'autre de ces appareils. E représente un électro-dynamomètre, W un wattmètre dont la bobine fixe est placée dans le circuit et la bobine mobile reliée aux deux extrémités m et n du conducteur du câble. En T est un rhéostat. On envoie d'abord dans le circuit un courant alternatif, la déviation du wattmètre étant α_1 on a :

$$P = K \alpha_1$$

l'électro dynamomètre indique une certaine déviation.

On manœuvre ensuite le commutateur C, de manière à envoyer

1. La *Lumière électrique*. Tome 25, page 359.

Digitized by Google

dans le circuit, le courant de la dynamo et l'on manœuvre le rhéostat T jusqu'à ce que l'électro-dynamomètre indique la même déviation que dans le cas précédent.

L'intensité du courant continu est alors égale à l'intensité efficace du courant alternatif. Si la dérivation du wattmètre est α_2, la puissance p perdue dans le câble est :

$$p = K\,\alpha_2$$

à puissance dissipée dans le cas du courant alternatif P_d est :

$$P_d = P - p = K\,(\alpha_1 - \alpha_2)$$

$$\frac{P_d}{P} = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} - 1$$

On voit que par ce procédé, le rapport des deux puissances est indépendant de la constante du wattmètre.

Il y a cependant lieu de faire une remarque, on mesure $p = R\,I^2$, R étant la résistance ohmique du circuit, mais pour les courants alternatifs, la résistance effective est plus forte que la résistance ohmique, de sorte qu'en somme la puissance dissipée en dehors du conducteur, peut être plus faible que celle trouvée dans les expériences.

Les essais ont été effectués sur une longueur de 200 mètres de câble, le conducteur avait une section de 30 m. m.² et était isolé au caoutchouc.

Les expériences ont porté sur trois modèles différents du câble.

Dans le premier modèle, le caoutchouc était simplement recouvert d'une tresse goudronnée; dans le deuxième la tresse était recouverte d'une gaîne de plomb de 1 m. m. d'épaisseur; dans le troisième, par dessus le plomb, il y avait une couche de jute goudronnée, puis une armature constituée par des fils de fer de 3 m. m. de diamètre et le tout était recouvert d'un matelas de toile bitumée.

La fréquence du courant alternatif était de 50 périodes à la seconde, l'alternateur était du type Siemens

1er *modèle de câble.* — En enroulant le câble sur une bobine avec flasques en fonte, on a trouvé

$$I_{eff} = 18 \text{ ampères} \qquad P = 471 \text{ watts} \qquad p = 38\ w.$$

$$P_d = 433\ w. \qquad \frac{Pd}{p} = \frac{433}{38} = 11{,}40$$

Digitized by Google

Ceci montre l'importance que peuvent prendre les courants parasites dans une masse de métal non divisée, car en posant le câble sur le sol on a trouvé

$$P = 40{,}75\ w. \qquad p = 40{,}75\ w. \qquad P_d = 0$$

Ceci montre que dans le câble employé, la résistance effective était la même que la résistance ohmique, ce qui provient d'une part de la faible fréquence employée et d'autre part de ce que probablement le câble était constitué de fils de faible diamètre.

2e *modèle de câble.*

1re *expérience.* — Le câble reposant simplement sur le sol, on a obtenu :

$$I_{eff} = 18\ a. \qquad P = 41{,}25\ w. \qquad p = 40{,}75\ w.$$
$$P_d = 0{,}50\ w. \qquad \frac{Pd}{p} = 0{,}011$$

2e *expérience.* — Les deux extrémités de la gaîne de plomb étant reliées par un fil de cuivre, on a obtenu.

$$I_{eff} = 18\ a. \qquad P = 41{,}50\ w. \qquad p = 40{,}75\ w.$$
$$P_d = 0{,}75\ w. \qquad \frac{Pd}{p} = 0{,}018$$

3e *modèle de câble.*

1re *expérience.* — Le câble reposant simplement sur le sol, on a obtenu :

$$I_{eff} = 18\ a. \qquad P = 48{,}25\ w. \qquad p = 41\ w.$$
$$P_d = 7{,}5\ w. \qquad \frac{Pd}{p} = 0{,}18$$

2e *expérience.* — Les deux extrémités de l'armature de fer du câble étant reliées, on a obtenu :

$$I_{eff} = 18\ a. \qquad P = 52{,}25\ w. \qquad p = 41\ w.$$
$$P_d = 11{,}25\ w. \qquad \frac{Pd}{p} = 0{,}274$$

3e *expérience.* — Les deux armatures de plomb et de fer étant reliées en quantité et les extrémités également reliées, on a obtenu :

$$I_{eff} = 18\ a. \qquad P = 55{,}25\ w. \qquad p = 41\ w.$$
$$P_d = 14{,}25\ w. \qquad \frac{Pd}{p} = 0{,}345$$

Digitized by Google

En somme relier les deux extrémités de l'armature, c'est fermer sur lui-même le circuit secondaire d'un transformateur, de sorte qu'il s'y développe un courant d'induction, d'autant plus intense que la résistance est plus faible, ainsi qu'on le voit en comparant les 2e et 3e expériences sur le modèle N° 3.

Les pertes doivent évidemment croître avec la fréquence, M. Jacquin n'a pu augmenter la vitesse de l'alternateur qu'il employait. Il a simplement constaté qu'avec une fréquence moitié moindre, les pertes étaient diminuées d'environ 60 %.

M. Jacquin en conclut que pour des fréquences de 100, la perte dans un câble avec gaine de plomb, est de 2 à 3 % de la perte due à la résistance du câble, c'est-à-dire qu'elle est négligeable.

Dans un câble avec gaine de plomb et armature de fer, la perte de puissance p est au grand maximum de 45 à 60 % de la perte due à la résistance du câble. Comme dans les distributions on s'arrange ordinairement pour perdre, par suite de la résistance du câble, au plus 5 % de la puissance totale transportée. La perte supplémentaire est alors au plus 2,5 % de la puissance totale.

§ 5. — ISOLEMENT DES CONDUCTEURS

L'isolement d'un câble doit répondre à deux conditions principales :

1° Il doit être suffisant pour que la perte due au passage du courant à travers l'isolant, ne donne pas lieu à une dépense d'énergie dépassant une certaine quotité de l'énergie totale à transporter.

2° Il doit être suffisant pour empêcher toute décharge disruptive entre un conducteur et la terre ou entre deux conducteurs.

Nous examinerons plus loin les mesures de précaution à prendre au point de vue de la sécurité des personnes.

a) ***Résistance d'isolement.*** — Les câbles ont presque toujours une section circulaire, car cette forme permet une répartition bien uniforme de l'isolant et la fabrication en est facilitée.

Soient, d le diamètre extérieur du conducteur, D le diamètre extérieur de l'isolant et l la longueur du câble.

Considérons une couche de matière isolante de rayon x, d'épaisseur

Digitized by Google

dx, de résistivité ρ. La surface étant $2\pi x l$ et l'épaisseur dx, la résistance dR sera donnée par la relation :

$$d\mathrm{R} = \frac{\rho\, dx}{2\pi l x}$$

La résistance totale R, de l'isolant (d'épaisseur $\frac{\mathrm{D}-d}{2}$) sera :

$$\mathrm{R} = \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{\mathrm{D}}{2}} d\mathrm{R} = \frac{\rho}{2\pi l} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{\mathrm{D}}{2}} \frac{dx}{x} = \frac{\rho}{2\pi l} \log_n \frac{\mathrm{D}}{d}$$

On a :

$$\log_n \frac{\mathrm{D}}{d} = 2{,}30 \log \frac{\mathrm{D}}{d}$$

d'où

$$\mathrm{R} = 0{,}37 \frac{\rho}{l} \log \frac{\mathrm{D}}{d}$$

Pour que deux câbles, de même longueur et de même composition aient la même résistance d'isolement, il faut que dans chacun d'eux le rapport du diamètre extérieur au diamètre intérieur de l'isolant soit le même.

Plus le diamètre d'un conducteur est grand, plus grande est la quantité de matière isolante à employer pour avoir une même résistance à l'isolement.

En effet pour R, ρ et l donnés, on trouve pour $\frac{\mathrm{D}}{d}$ une certaine valeur, soit $\mathrm{D} = m\, d$.

Le volume de l'isolant est :

$$v = \frac{\pi}{4} d^2 (m^2 - 1)\, l$$

c'est-à-dire qu'il est proportionnel à d^2.

Si E est la différence de potentiel efficace en volts, I l'intensité efficace du courant en ampères, R la résistance d'isolement en ohms; si l'on veut que la perte du courant à travers le diélectrique soit de p pour 100, on devra avoir :

$$\mathrm{R} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{I}'} = \frac{100\ \mathrm{E}}{p\ \mathrm{I}}$$

Digitized by Google

Si d et l sont exprimés en centimètres, la valeur à prendre pour ρ est la résistance en ohms d'une pièce de l'isolant de un centimètre carré de section et d'un centimètre d'épaisseur.

La résistance des isolants varie beaucoup avec la température, la durée de l'électrisation et la pression exercée.

Voici, d'après M. Preece, les résistances spécifiques de quelques isolants.

DÉSIGNATION DE L'ISOLANT	TEMPÉRATURE	RÉSISTANCE en ohms, d'une pièce de 1 centimèt. carré de section et 1 centimèt. carré d'épaisseur
Air (résistance pratiquement infinie) . .	»	∞
Mica	20°	$0{,}0084 \times 10^{16}$
Gutta-percha	24°	$0{,}045 \times 10^{16}$
Caoutchouc	24°	$1{,}09 \times 10^{16}$
Caoutchouc vulcanisé	24°	$1{,}5 \times 10^{16}$
Ebonite	46°	$2{,}8 \times 10^{16}$
Paraffine	46°	$3{,}4 \times 10^{16}$
Caoutchouc Siemens pour grand isolement.	15°	$1{,}617 \times 10^{16}$
Caoutchouc Siemens ordinaire pur vulcanisé.	15°	$0{,}228 \times 10^{16}$
Composition Fowler et Waring . . .	15°	$0{,}733 \times 10^{16}$
Bitume vulcanisé (Callender)	15°	$0{,}045 \times 10^{16}$
Caoutchouc vulcanisé	15°	$0{,}163 \times 10^{16}$
Matière fibreuse spéciale pour les grands isolements	15°	$1{,}190 \times 10^{16}$

Le papier a une grande résistance à l'isolement, mais elle baisse à mesure que la pression augmente.

Ainsi, le papier ordinaire à la pression o a une résistance spécifique de 4.850×10^6 ohms centimètres et à la pression de 20 kilogrammes par c. m.^{2}, la résistance descend à 467×10^6 ohms centimètres.

Pour le papier gris du commerce, on a respectivement 3.100×10^6 et 800×10^6, pour le papier parcheminé jaune 3500×10^6 et 800×10^6.

Quand on fabrique des câbles en employant toujours le même procédé et la même matière pour l'isolement, on peut prévoir l'isolement après fabrication, mais le moindre changement dans les

Digitized by Google

procédés de fabricatien ou dans le dosage des matières, peut faire varier l'isolement dans de grandes limites.

b) ***Décharges disruptives.***

Les premières expériences ont été faites avec le courant continu, soit au moyen de piles (Warren de la Rue), soit avec une machine statique (Mascart) et ont porté sur l'air comme diélectrique.

Quand on a repris ces expériences avec les courants alternatifs, avec intermédiaire de transformateurs pour élever les tensions, on a pu constater que les distances explosives dans l'air sont beaucoup plus faibles avec les sources statiques qu'avec les sources dynamiques. MM. Siemens et Cie (1) ont fait exécuter dans leurs ateliers de Woolwich, sous la direction de M. le Dr Bour, des expériences sur la distance explosive des courants alternatifs dans diverses matières.

Dans toutes ces expériences, la fréquence, sauf indication contraire, étant de 100 périodes à la seconde. Le voltage était mesuré au moyen d'un électromètre électrostatique de Thompson.

Les premières expériences ont porté sur la distance explosive dans l'air. On mesurait la tension aux bornes d'un transformateur alimenté par un alternateur, puis l'une des électrodes étant fixée horizontalement, on rapprochait l'autre au moyen d'une vis micrométrique donnant le centième de m. m. jusqu'à ce que les étincelles se manifestent. Chaque expérience était répétée trois fois et on polissait chaque fois les électrodes.

Les courbes de la figure 266 donnent les résultats de ces expériences.

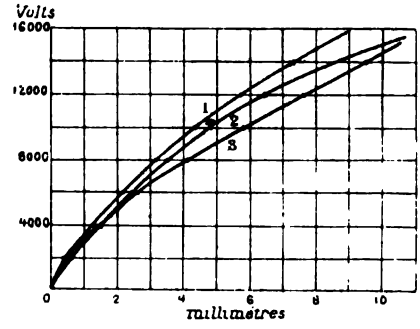


Fig. 266.

La courbe 1 a été obtenue avec une électrode fixe formée d'un

1. La *Lumière électrique* du 16 avril 1892.

Digitized by Google

disque de 100 m. m. de diamètre, à bords arrondis et une électrode mobile formée par une demi-sphère de 10 m. m. de diamètre La température ambiante était de 16 à 17° C. et l'humidité de 80 %.

La courbe 2 a été obtenue avec les deux électrodes constituées par des disques de laiton, l'un fixe de 100 m. m. de diamètre, l'autre mobile de 37 m. m. de diamètre, à bords arrondis, la température ambiante était de 14°,75 C.

Le courbe 3 a été obtenue avec la même électrode fixe, l'électrode mobile était constituée par une pointe d'acier faisant un angle de 60° et dont la section était un triangle équilatéral de 5 m. m. de côté, la pointe était polie après la production de chaque étincelle et cependant ces dernières ne passaient pas toujours par cette pointe. La température ambiante était de 12° C. et l'humidité d'environ 50 %.

On a répété les expériences avec une fréquence de 80 périodes et on a trouvé peu de différence, quoique d'après des considérations théoriques, on aurait dû s'attendre à ce que la distance explosive varie en raison directe de la fréquence.

On a examiné l'influence d'une capacité, en reliant un ou plusieurs fils isolés à la gutta, au circuit du transformateur, en parallèle avec le micromètre. On constata que la distance explosive diminuait avec la capacité.

Avec les disques, on a trouvé pour 10.000 volts.

Sans capacité 4,50 m. m. Avec une capacité de 0,113 microfarad, 4,17 m. m. et avec une capacité de 0,28 microfarad 3,94 m. m.

Avec les autres électrodes (surface sphérique et pointe), on a trouvé :

Sans capacité, 4,50 m. m. avec capacité de 0,14 microfarad 4,08 m. m. et avec capacité de 0,28 microfarad 4,06 m. m.

Avec le disque et la pointe, on a trouvé :

Sans capacité 5,78 m. m. et avec capacité de 0,14 microfarad 4,83 m. m.

On a constaté ensuite, en faisant varier la position du micromètre le long du câble, que l'on avait toujours la même distance explosive.

Le voltage mesuré par le voltmètre électro-statique est le voltage efficace, comme il est certain que c'est le plus haut voltage qui intervient pour la formation de l'étincelle, il faut pour obtenir ce voltage, multiplier les chiffres donnés par $\sqrt{2}$.

Digitized by Google

Les chiffres obtenus peuvent alors s'appliquer aux courants continus. On a, en effet, constaté que les résultats sont pratiquement identiques à ceux obtenus en 1878 par Warren de la Rue.

On a également procédé à des expériences sur divers isolants, en mesurant le voltage au moyen du voltmètre électro-statique et dans le cas des plus hautes valeurs, par la balance des volts de sir W. Thomson. Les courbes de la figure 267 donnent les résultats obtenus avec diverses substances.

La courbe 1 a été obtenue avec plusieurs épaisseurs de calicot enduit, les couches étaient fortement pressées entre les électrodes, disque et sphère, les points de la courbe se rapportent au voltage de rupture minimum.

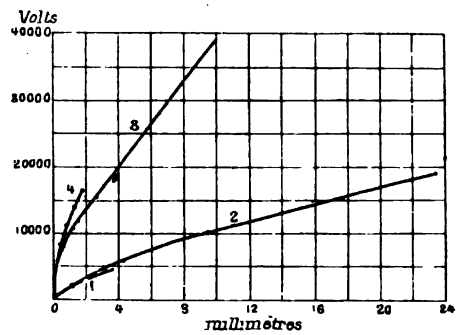


Fig. 267

La courbe 2 se rapporte à des câbles concentriques dont l'isolement était obtenu au moyen d'une matière fibreuse enduite; on reliait les bornes du transformateur aux deux conducteurs.

La courbe 3 se rapporte à des câbles concentriques isolés au caoutchouc et donne également le voltage efficace minimum auquel l'étincelle passait pour diverses épaisseurs.

La courbe 4 se rapporte à la distance explosive à travers du celluloïd, essayé sous forme de feuilles placées entre les deux disques du micromètre.

M. Steinmetz (1) a procédé à des expériences sur les distances explosives, en se servant comme source d'un alternateur Westinghouse de 50 volts et 15 ampères et de transformateurs; la f. e. m. dans le circuit secondaire était déterminée au moyen de quelques tours d'un

1. *L'Électricien* du 20 mai 1893

Digitized by Google

fil enroulé directement sur le circuit secondaire et relié à un électrodynamomètre.

Toutes les expériences ont été faites à la fréquence de 150 et chaque fois en augmentait graduellement la tension au moyen de l'excitation de l'alternateur jusqu'à la disruption.

Pour connaître la différence de potentiel maximum, il faudrait connaître la courbe du courant employé; M. Steinmetz a admis qu'elle était sinusoïdale, ce qui revient à multiplier la tension efficace par $\sqrt{2}$.

Comme électrodes, M. Steinmetz s'est servi de disques de métal de 5 centimètres de diamètre; les diélectriques solides étaient serrés entre ces plaques, les bords dépassant beaucoup ceux des électrodes, pour empêcher autant que possible les décharges en aigrettes; dans le cas des liquides, les électrodes étaient complètement immergées.

Les formules ci-dessous résument assez bien les résultats expérimentaux obtenus; les distances d sont exprimées en millièmes de centimètres et les différences de potentiel (maxima) v, en Kilovolts :

Air	$d = 36\,(e^{-1,3v} - 1) + 54\,v + 1,2\,v^2$	entre 500 et 24000 volts, v compris entre 0,5 et 24
Mica	$d = 0,24\,v + 0,0145\,v^2$	entre 800 et 16500 volts
Fibre vulcanisée	$d = 7,66\,v + 2,3\,v^2$	entre 8000 et 22000 volts
Papier paraffiné	$d = 8\,v$	entre 6900 et 24800 volts
Paraffine fondue	$d = 12,4\,v$	entre 3900 et 27000 volts
Huile de lin bouillie	$d = 12,5\,v$	entre 7600 et 21000 volts

Les deux dernières formules mettent bien en valeur les mérites des huiles comme isolants pour les hautes tensions, puisqu'il suffit d'une distance quatre ou cinq fois plus faible que pour l'air, pour d'empêcher le passage de la décharge.

§ 6. — LES SYSTÈMES DE CABLES CONDUCTEURS

Nous classerons les câbles conducteurs d'après le mode d'isolation en :

Digitized by Google

1° Câbles isolés par l'air;

2° Câbles dont l'isolement est obtenu au moyen d'une matière homogène;

3° Câbles dont l'isolement est obtenu au moyen de matières fibreuses imprégnées de matières isolantes;

4° Câbles dont l'isolement définitif est obtenu après la pose.

On peut en outre classer les câbles en deux classes :

1° Les câbles simples;

2° Les câbles concentriques.

L'avantage des câbles concentriques est leur facilité de pose, ils n'occasionnent aucune perte d'énergie dans l'armature et ne donnent pas lieu à des effets d'induction dans les circuits voisins.

Par contre, ils coûtent plus cher que deux conducteurs simples, de section équivalente, car ils exigent un isolement double entre le conducteur intérieur et le conducteur extérieur et comme le conducteur extérieur a un grand diamètre, il faut beaucoup de matière pour obtenir un isolement donné (page 330). On gagne, il est vrai, de n'avoir qu'une seule armature, mais comme elle a un très grand diamètre, l'économie est de peu d'importante.

A l'usine des Halles, par exemple un câble concentrique est revenu à 33 francs tandis que le mètre de câble simple, pour un conducteur de même section revenait à 8 fr. 35.

Nous allons étudier les divers systèmes de câbles les plus employés, en les classant d'après le système d'isolation.

a) Câbles isolés par l'air.

Comme nous l'avons vu, la résistance de l'air est pratiquement infinie, il suffit donc de placer le conducteur aller et le conducteur retour à une distance suffisante l'un de l'autre pour que l'on ait pas à craindre de décharge disruptive.

L'inconvénient est qu'il faut soutenir le câble de place en place, ce qui nuit beaucoup à l'isolation, comme nous le verrons lors de l'étude des diverses systèmes de canalisations.

b) Câbles dont l'isolement est obtenu au moyen d'une substance homogène.

Il faut qu'une telle substance soit bien homogène afin que l'isolement ne présente pas des points faibles, qu'elle soit suffisamment élastique pour ne pas se briser lorsqu'on enroule le câble, etc., elle

Digitized by Google

doit résister à une certaine température sans se ramollir, afin que le conducteur soit toujours bien maintenu.

Les substances ordinairement employées sont la gutta-percha, la bitite, le caoutchouc, etc...

La *gutta-percha* a le défaut d'être cassante à froid et de se ramollir très vite, on ne l'emploie guère qu'en télégraphie.

La *bitite* est du bitume épuré et vulcanisé, elle est employée par la Callender C°, dont nous étudierons plus loin le système de canalisation.

Le *caoutchouc* est la seule matière isolante répondant à toutes les conditions énoncées ci-dessus. Sa résistance d'isolement est comme nous l'avons vu très considérable et si l'on considère la distance explosive (page 334), il l'emporte encore sur les autres isolants.

Quand le caoutchouc est pur, il contient un principe dissolvant qui le fait pourrir, le rend d'abord visqueux puis le transforme en résine.

On peut obvier à cet inconvénient en le mélangeant à des matières inertes, comme le blanc de Meudon, l'oxyde de zinc, etc., qui absorbent le principe dissolvant mais qui par contre diminuent la résistance à l'isolement.

Pour fabriquer un câble isolé au caoutchouc, on procéde ordinairement de la manière suivante. On recouvre d'abord le conducteur d'un ruban préparé, puis on applique sous une pression considérable deux couches de caoutchouc mélangé et laminé, coupé en bandes de longueur plus ou moins considérable, de manière à bien former deux joints longitudinaux. Le tout est recouvert d'une forte tresse et armé au besoin.

Les joints ainsi faits peuvent résister même sous l'eau, quand la fabrication est bonne.

Comme le caoutchouc mélangé doit être employé en couches plus épaisses que le caoutchouc pur, la couche est plus facilement rendue homogène comme épaisseur et les joints se font mieux.

Afin d'annuler l'effet du dissolvant on peut également avoir recours à la vulcanisation du caoutchouc après fabrication, c'est-à-dire qu'on le combine chimiquement avec 6 à 8 % de soufre. Si on procéde à la vulcanisation, les joints ne sont plus simplement mécaniques, on ne peut plus même reconnaître leur emplacement quand on coupe le câble.

L'inconvénient est que, si il y a du soufre en excès, il attaque le

Digitized by Google

cuivre. On peut remédier à cet inconvénient, soit en étamant le conducteur soit en y appliquant une tresse ou ruban, soit plutôt en ne mettant que juste la quantité de soufre nécessaire à la vulcanisation, c'est-à-dire se combinant chimiquement avec le caoutchouc.

Pour fabriquer un câble en caoutchouc vulcanisé (1), on procède de la manière suivante :

On enroule en spirale sur le conducteur des bandes de caoutchouc pur, les spirales se succédant en sens inverse. On place ensuite des couches de caoutchouc mélangé, formées chacune de deux bandes placées l'une au-dessus l'autre au-dessous, en ayant soin de ne pas faire coïncider les joints successifs.

On lamine le tout, de manière à bien serrer les joints, on enroule par dessus, en spirale, des bandes de caoutchouc bien serrées et on vulcanise ensuite. On a ainsi l'avantage d'avoir des joints non mécaniques et comme ces derniers ne se correspondent pas, si l'un d'eux vient par hasard à manquer, les autres résistent.

Pour la vulcanisation, on enroule le câble sur un tambour et on le porte dans la chaudière. Si le câble ne peut être enroulé, on l'y place en couches séparées par du blanc de Meudon.

On ne doit jamais placer des câbles isolés au caoutchouc dans des endroits où la température peut atteindre un certain degré, tels par exemple que des égouts où se trouvent des conduites de vapeur.

M. Navier de New-York a placé trois câbles caoutchoutés, dont l'isolement à 17° était de 1.500 megohms, dans un bac et les y a portés à une température de 100°. Les câbles n'avaient plus alors que des isolements variant de 9,5 à 12,4 megohms; revenus à la température initiale, ils avaient le même isolement qu'auparavant.

M. Navier a également constaté que la capacité augmente avec la température, elle croît de 140 % entre 47° et 100, ce qui est dû à l'augmentation du pouvoir inducteur spécifique du caoutchouc.

Le tableau ci-dessous indique la composition et les dimensions de câbles isolés au caoutchouc fabriqués pour l'usine municipale des halles (2400 volts), par la maison Ménier.

1. Les *Câbles d'éclairage électrique* par Stuart A. Roussel.

Digitized by Google

Sections en millimètres carrés	20	40	80	160
Diamètre du conducteur en millimètres. . . .	5,7	8,0	11	16
Épaisseur du caoutchouc pur en millimètres. .	0,5	0,5	0,5	0,5
— — vulcanisé. . en m/m.	2,0	0,25	2,5	2,5
— de deux rubans caoutchoutés . » .	1,0	1,0	1,0	1,0
— d'une tresse en chanvre . . . » .	1,0	1,5	1,5	1,5
— de l'enduit Ménier. . . . . » .	3,0	4,0	4,5	5
Diamètre total approximatif en millimètres . .	14	17	21	27

c) Câbles dont l'isolement est obtenu au moyen de matières fibreuses, imprégnées de matière isolante.

L'isolant de ces câbles n'est pas absolument homogène, il peut y exister des trous facilitant les décharges disruptives, on ne doit donc guère les employer pour des tensions dépassant 3.000 volts. Il faut cependant en excepter les câbles Ferranti isolés avec du papier, que nous étudierons plus loin.

On peut employer comme matière isolante, de la cire, de la paraffine, etc., que l'on chauffe pour les liquéfier, ou bien des substances toujours liquides, comme le pétrole, les huiles résineuses, etc...

Ce genre de câbles doit être préservé de l'humidité et pour celà on les garnit d'une armature de plomb posée soit à chaud, soit à froid sous haute pression.

Le *pétrole* est obtenu après distillation de toutes les matières volatiles, huiles à éclairer, à lubrifier, cires, etc.., il reste alors une masse épaisse, lourde et noire, qui fond à une température assez élevée et qui est à peu près ininflammable.

Ce produit est excellent comme isolant, il a une grande résistance spécifique et une faible capacité inductive.

L'huile résineuse lourde constitue un très bon isolant, au moyen duquel on peut remplir à chaud les pores des matières végétales, telles que le jute et le coton et il en expulse l'air et l'humidité. Cette huile a une grande résistance spécifique et une grande distance explosive pour l'étincelle.

Nous allons décrire quelques systèmes de câbles spéciaux, dont l'isolement est obtenu au moyen d'une substance imprégnée de matière isolante.

Digitized by Google

Les *câbles Berthoud et Borel* de Cortaillod. Suisse (concessionnaire en France, la Société des anciens établissements Cail) sont des câbles concentriques avec triple enveloppe de plomb (fig. 268). Ces enveloppes sont posées à froid sous une pression de 50 à 60 atmosphères, l'une sépare le conducteur intérieur du conducteur extérieur, les deux autres sont placées entre le conducteur extérieur et l'armature.

Fig. 268

L'isolant est constitué par des couches de tissu enroulées en hélice et en sens inverse les unes des autres. Lorsque le conducteur (soit intérieur soit extérieur) est recouvert des couches de tissu, on le met à la cuisson dans une chaudière à l'air libre contenant une matière résineuse, puis on l'enrobe dans la gaîne de plomb, qui est étirée ensuite.

Entre les deux couches extérieures de plomb, il y a une couche de brai. La gaine extérieure est recouverte d'une couche de jute goudronné sur laquelle est enroulé un double ruban d'acier, recouvert de deux couches de toile goudronnée enroulées en spirale.

Le tableau suivant, extrait d'un article de M. Dieudonné (1), sur les canalisations électriques de la ville de Paris, donne le diamètre extérieur en m. m. des diverses parties des câbles concentriques, fabriqués par la Société des anciens établissements Cail.

SECTIONS des conducteurs en millimètres carrés	200/200	150/150	100/010	80/80	60/60	40/40	30/30	20/20
Corde centrale . .	18,6	16,0	13,0	11,6	10,0	8,2	7,0	5,8
Isolant central . .	34,6	32,0	29,0	27,6	26,0	24,2	23,0	21,8
Plomb central . .	38,2	35,0	31,5	29,8	27,8	26,0	24,8	23,6
Cuivre concentrique	42,4	38,4	34,3	32,2	29,8	27,8	26,4	25,0
Isolant	54,4	50,4	46,3	44,2	41,8	39,8	38,4	37,0
Premier plomb . .	59,2	55,0	50,3	48,0	45,6	43,4	42,0	40,6
Deuxième plomb .	66,0	61,4	56,4	54,0	51,2	49,0	47,6	45,8
Jute	72,0	64,4	59,4	57,0	54,2	52,0	50,6	48,8
Ruban de fer . .	75,2	67,5	62,6	60,2	57,4	55,0	53,8	52,0
Ruban au goudron.	77,0	73,6	69,0	65,2	59,2	58,0	57,0	55,0

1. *L'Électricien* du 18 mars 1893.

Digitized by Google

La résistance d'isolement est de 4 à 5000 megohms par kilomètre. Dans les essais des câbles employés au secteur des Champs-Elysées, les câbles qui doivent fonctionner à une tension efficace de 3000 volts, devaient subir une tension de 6000 volts entre les deux âmes et présenter après l'essai, l'isolement donné ci-dessus.

La capacité entre le conducteur intérieur et extérieur est pour le câble de $\frac{80}{80}$ m. m.² de section de 0,19 microfarad par kilomètre, ce qui donne, puisque le diamètre extérieur du conducteur intérieur est de 1,16 c. m. et le diamètre intérieur du conducteur extérieur de 2,76 c. m. une capacité inductive spécifiante de 2,96 pour l'isolant (page 316).

Câbles Siemens. L'isolement est obtenu avec du jute (chanvre des Indes) imprégné d'une composition bitumineuse spéciale, mélangée d'huile lourde. Le câble isolé est ensuite recouvert à basse température et sous haute pression, d'une gaîne de plomb, qui est ensuite recouverte de jute ou de rubans enduits d'une composition bitumineuse.

On enroule par dessus en spirale, deux bandes de fer que l'on entoure ensuite de jute goudronné.

Les câbles concentriques sont fabriqués de la même manière, sans interposition d'une enveloppe de plomb entre les deux conducteurs.

La *Norwich insulation wire Company* emploie comme isolant, des bandes de papier imprégné d'une composition spéciale. Ces bandes sont enroulées en spirale et à chaque tour comprimées à la filière.

Le câble ainsi garni est plongé dans un bain de composition spéciale, maintenu à 120 degrés.

On place ensuite la gaîne de plomb, au moyen d'une presse.

Câbles Patterson. Les enveloppes de plomb posées sous pression, peuvent présenter des fissures que l'on n'aperçoit pas lors de la fabrication, mais qui n'en laissent pas moins pénétrer l'humidité ce qui détruit bientôt l'isolation.

M. Patterson pour obvier à cet inconvénient, fabrique ses câbles de la manière suivante :

Le conducteur enveloppé de coton imprégné de parafine est placé dans un tube en plomb. Le vide qui existe entre l'enveloppe du conducteur et le tube de plomb est rempli sous pression de paraffine

Digitized by Google

liquéfiée mélangée à un gaz sec (qui rempli le vide laissé par la paraffine en se contractant). Comme on introduit la paraffine sous pression, on contrôle en même temps l'étanchéité de la gaine de plomb.

Câbles Felten et Guilleaume (concessionnaire pour la France, la Société industrielle des Téléphones). Le conducteur, composé d'un fil ou d'une corde de fils de cuivre, est enveloppé d'une ou plusieurs couches de jute ou de papier, puis enroulé sur une bobine et desséché à chaud dans des cuves en fonte, dans lesquelles on fait le vide.

La dessiccation étant jugée suffisante, on remplit la cuve d'une matière spéciale qui imprègne le jute.

Le câble est alors sorti du bain et mis sous une première gaine de plomb étirée à froid sous pression. Il est ensuite muni d'un enduit avant d'être recouvert d'une deuxième gaine de plomb.

Ce double manteau de plomb assure une étanchéité parfaite. Par dessus on place une couche de jute goudronné puis l'armature, afin que celle-ci ne puisse détériorer le plomb ni pendant la fabrication, ni pendant la pose.

L'armature protectrice est composée de deux rubans de fer ou d'acier enroulés en spirale, dont le second sert de couvre-joints au premier.

Une couche de jute goudronné, recouverte de compound, préserve les rubans de fer du contact de l'air et de l'humidité.

Les câbles pour basse tension sont isolés uniquement par une série de couches de jute.

Les câbles pour haute tension, le sont par des couches de papier et de jute. Le papier offrant plus de résistance que le jute au passage de l'étincelle.

Les dimensions approximatives d'un câble concentrique de 200 m.m.² pour 3000 volts, sont :

Diamètre de la corde de cuivre du premier conducteur . .	18,3 mm
Epaisseur de l'isolant	5,0
Diamètre de la corde de cuivre du deuxième conducteur . .	33,9
Epaisseur de l'isolant	5,0
Epaisseur des gaînes de plomb	1,6
Epaisseur du fer feuillard	1,3

l'isolement kilométrique est supérieur à 2000 megohms.

Digitized by Google

La capacité du conducteur intérieur, le conducteur extérieur et le plomb étant à la terre, est d'environ 0,45 microfarad par kilomètre.

La capacité du conducteur extérieur, le conducteur intérieur et le plomb étant à la terre, est inférieure à 1,10 microfarad par kilomètre.

Câbles Ferranti. — M. Ferranti pour le transport du courant à 10.000 volts, a imaginé un système de câbles concentriques, tout à fait particulier.

Les deux conducteurs sont constitués par des tubes de cuivre. Le tube intérieur est recouvert de papier non collé, trempé dans de la cire noire liquéfiée. On place ainsi plusieurs couches de papier, en ayant soin de croiser les joints, chaque couche étant comprimée fortement au moyen d'un mandrin spécial pendant que le papier est encore chaud.

Quand la couche isolante à une épaisseur suffisante le tube est glissé sous forte pression, dans le tube formant conducteur extérieur, ce qui comprime fortement l'isolant.

Le tube extérieur est ensuite isolé comme le tube intérieur et l'ensemble est glissé sous pression dans un tube protecteur en fer. On introduit alors sous pression entre ce tube de fer et le câble de la cire noire.

La longueur de chaque portion du câble est de 20 pieds anglais (6,10 mètres), les joints sont donc très fréquents, nous examinerons leur fabrication dans le paragraphe relatif aux canalisations souterraines.

M. Ferranti a fabriqué pour l'usine de Deptford, trois séries de câbles, dont les conducteurs ont respectivement chacun des sections de 80, 160 et 320 m. m.^{2} destinés à des courants de 125, 250 et 500 ampères d'intensité efficace.

Les câbles de 160 m. m.^{2} de section, ont les dimensions suivantes :

Diamètre	intérieur du tube	intérieur	. . . .	14,28 mm.
—	extérieur —	—	. . . .	21,43 —
—	intérieur —	extérieur	. . . .	46,83 —
—	extérieur —	—	. . . .	49,21 —

La résistance est après la pose de 0,20 ohm par kilomètre, aller et retour, c'est-à-dire sensiblement la même que si les conducteurs étaient ininterrompus, malgré le grand nombre de joints (non soudés).

Digitized by Google

La résistance d'isolement entre les conducteurs intérieur et extérieur est de 435 megohms par kilomètre.

La capacité entre les deux conducteurs est d'environ 0,220 microfarad par kilomètre, la capacité entre le conducteur extérieur et la terre est à peu près dix fois plus grande.

D'après M. Stuart A. Roussel, les *prix de revient des câbles isolés* sont les suivants :

Pour basse tension 0,044 à 0,056 franc par mètre courant et par m. m.^{2} de section.

Pour haute tension 0,085 à 0,105 franc.

Pour les câbles armés, il faut ajouter par mètre courant $(0{,}004\,s + 1{,}375)$ franc, s étant la section du conducteur en m. m.^{2}.

Un câble armé pour basse tension, revient donc par mètre courant à :

$$\{\ (0{,}048 \text{ à } 0{,}060)\ s + 1{,}375\ \} \text{ franc}$$

et un câble armé pour haute tension à :

$$\{\ (0{,}089 \text{ à } 0{,}109)\ s + 1{,}375\ \} \text{ franc}$$

§ 7. — SYSTÈMES DE CANALISATION.

Les canalisations peuvent être soit *aériennes* soit *souterraines*.

Les lignes aériennes sont en général d'une construction plus économique que les lignes souterraines, le potentiel peut y être plus élevé et on peut très facilement augmenter la section des conducteurs en plaçant de nouveaux fils, ce que l'on ne peut, comme nous le verons plus loin, toujours faire économiquement quand les lignes sont souterraines.

Actuellement, pour les lignes souterraines on ne peut guère dépasser une tension efficace de 10.000 volts, tandis que pour les lignes aériennes, on peut atteindre jusqu'à 20 et même 30.000 volts.

Par contre, les lignes aériennes sont plus exposées que les lignes souterraines et donnent lieu à une surveillance et à un entretien plus considérables (étant donné naturellement que les lignes souterraines sont établies dans de bonnes conditions). On doit compter en moyenne

Digitized by Google

pour l'entretien annuel des lignes aériennes de 5 à 10 % du prix de revient, et pour les lignes souterraines bien établies de 2 à 3 %.

En général, dans les grandes villes, les règlements s'opposent à l'emploi des lignes aériennes.

Toutes les fois qu'on le pourra, surtout si le potentiel est très élevé, on emploiera des lignes aériennes, qui bien construites et bien surveillées donnent toute satisfaction.

Il arrive parfois qu'une partie de la canalisation est aérienne et l'autre souterraine, par exemple pour desservir une ville par une chute d'eau placée à une grande distance, on peut à l'usine hydraulique, soit employer des alternateurs à haut potentiel, soit des transformateurs élevant le potentiel des alternateurs, et installer une ligne aérienne parcourue par des courants de 10 à 20.000 volts.

A l'entrée de la ville, dans une ou plusieurs sous-stations, le courant est ramené à 2 ou 3.000 volts au moyen de transformateurs. Le courant des sous stations est amené en ville par une canalisation souterraine, sur laquelle sont branchés au besoin les transformateurs d'abonnés.

Parfois, dans des villes peu importantes, le courant à haute tension est amené aux transformateurs par une canalisation souterraine, tandis que le réseau secondaire (à 100 ou 200 volts) est aérien.

Nous allons étudier en détail les deux systèmes de canalisation.

§ 8. — LIGNES AÉRIENNES.

Le point le plus bas d'une canalisation aérienne, doit être, en pleine compagne, au moins à $2^m,50$ au-dessus du sol, à $6^m,50$ à la traversée des routes et chemins et à la traversée des lignes de chemin de fer au moins à $5^m,50$ au-dessus du niveau des rails.

Dans la campagne, les fils peuvent être nus, mais si la ligne est à haut potentiel, il faut prendre des précautions spéciales, placer par exemple, des pointes le long du poteau pour empêcher d'y grimper, y mettre des inscriptions (lors des expériences de Francfort, on avait dessiné des têtes de mort sur les poteaux).

A la traversée des chemins, il faut empêcher le fil de tomber si il

Digitized by Google

vient à casser, en mettant par exemple au-dessous un filet en treillis métallique.

Les poteaux supportant les lignes aériennes peuvent être en bois ou en fer.

Les poteaux en bois doivent être abattus en hiver.

Le bois, dépouillé de son écorce, doit être sain, dépourvu de gros nœuds et autres défauts. Les poteaux doivent être injectés à la créosote ou au sulfate de cuivre.

Le diamètre à la base dépend de la hauteur du poteau, et de la résistance qu'il doit avoir, il doit être au minimum de 20 centimètres, le diamètre au sommet doit être de 12 à 13 centimètres au moins.

Afin d'empêcher la pénétration de l'humidité dans l'intérieur du poteau, la pointe doit être taillée en cône et peinte à l'huile jusqu'à 10 centimètres au moins au-dessous de la base de ce cône.

Dans un terrain ordinaire, les poteaux de 8 mètres de hauteur, doivent être enfoncés de $1^m,40$ à $1^m,65$, ceux de 10 mètres de $1^m,75$ à $2^m,00$, et ceux de 12 mètres de $2^m,00$ à $2^m,75$

Dans les terrains mouvants, on doit les consolider au moyen de maçonneries de ciment.

Dans le rocher, l'enfoncement peut être moindre, mais il faut défendre absolument l'usage de la mine pour creuser les trous, car dans ce cas, il se produit des fissures, qui à la longue peuvent nuire à la solidité du scellement.

Les poteaux métalliques, peuvent être fabriqués de plusieurs manières.

Les poteaux de M. Charles Pertuis sont constitués par quatre cornières, entretoisées par des frettes en fer. L'emploi de frettes et l'absence de croisillons (nécessitant des trous de rivets dans les montants) ont pour résultat de faire travailler la matière dans de très bonnes conditions de résistance.

Les poteaux peuvent aussi être en fer forgé et de forme conique, dans ce cas quand leur hauteur dépasse six mètres, on emploie des tuyaux ajustés les uns dans les autres.

Les poteaux du tramway électrique de Lyon-Oullins, qui sont placés en face les uns des autres de chaque côté de la route et qui soutiennent au moyen d'un fil d'acier, le fil de cuivre du trolley ont 8,80 mètres de hauteur.

Digitized by Google

Chacun d'eux est formé de quatre tubes d'acier, soudés à recouvrement, et emmanchés les uns dans les autres à chaud les joints sont recouverts par des bagues en fonte.

D'après le cahier des charges, ils doivent pouvoir résister à une traction de 350 kilogrammes, appliquée à leur extrémité sans déflexion temporaire de plus de 14 millimètres et à une traction de 550 kilogrammes sans déflexion permanente.

Les dimensions des divers tubes sont données dans le tableau ci-dessous.

DÉSIGNATION ET LONGUEUR DES TUBES	DIAMÈTRE intérieur en centimètres	DIAMÈTRE extérieur en centimètres
1er tube. Longueur 4m,40.	16,0	17,2
2e — — 1 ,70.	13,6	14,6
3e — — 1 ,50.	11,2	12,1
4e — — 1 ,20.	8,7	9,5

Ces poteaux sont enfoncés de 1m,80 à 2 mètres dans le sol et bétonnés. Pour leur donner un aspect plus décoratif, on a muni la base d'un tube de fonte.

On peut aussi maintenir les poteaux métalliques en les introduisant dans un tube en fonte, muni d'une large embase ou d'une pointe que l'on enfonce dans le sol. On peut également les boulonner à traverses métalliques enfoncées dans le sol.

Pour le transport d'énergie de Tivoli à Rome, on a employé des poteaux mi-partie en bois, mi-partie en fer, constitués de la manière suivante :

Deux poutrelles en fer, à double T, de 160 m. m., ayant 9 m. de longueur, ont leurs parties inférieures boulonnées sur une plaque de fonte encastrée dans un massif de béton.

Ces poutrelles sont reliées par des boulons et distantes de 160 m. m. l'une de l'autre. A la partie supérieure est encastrée sur 90 c. m. entre les deux poutrelles une poutre de chêne de 3,40 m. de largeur ayant une section rectangulaire de 160 sur 200 m. m.

Digitized by Google

Les isolateurs à garde d'huile amovible (fig. 272) sont fixés à des tiges de fer de 30 m. m. de diamètre, courbées et terminées par une sorte d'étrier qui embrasse la partie en bois du poteau Cet étrier est serré par une large contre-plaque et deux écrous avec rondelles et contre-rondelles.

Le montant de chêne forme coussin isolant entre les poutrelles en fer et les consoles, de sorte qu'en cas de rupture d'un isolateur, le fil n'est pas à la terre. La hauteur au-dessus du sol des divers conducteurs (constitués par des câbles en cuivre électrolytique formés de 19 brins de 2,5 m. m. de diamètre) est respectivement de 9,30, 8,70 8,10 et 7,50 m. La distance horizontale moyenne entre les poteaux est d'environ 35 m.

Ainsi que nous le verrons plus loin, lors du calcul de la résistance des poteaux, il faut parfois les consolider au moyen de haubans ou de jambes de force.

Dans les campagnes, on peut relier un hauban, soit à un massif en maçonnerie fixé dans le sol, soit à une traverse enfouie. Au-dessous des jambes de force, afin de bien répartir la pression, on place au besoin une pierre plate ou une traverse.

Dans le cas de lignes à haute tension, tous les poteaux doivent être munis de paratonnerres reliés au sol, soit par un fil si le poteau est en bois, soit par le poteau lui-même, s'il est métallique.

Quand les fils doivent passer sur les toits des maisons, on les supporte au moyen de poteaux coniques en fer forgé, fixés à des selles de grande surface, qui sont placées sur les crêtes des toits. Ces poteaux, n'ayant pas de stabilité par eux-mêmes, doivent être haubannés dans trois directions au moins.

Quand les règlements le permettent, les fils (à basse tension) peuvent être supportés par des potelets en fer ou en bois fixés aux murs des maisons, au moyen de crampons scellés. En France, ces fils doivent être au moins à 0,20 m. du mur.

Isolateurs. — Les fils sont suspendus aux poteaux par l'intermédiaire d'isolateurs en porcelaine.

Si la tension ne dépasse 2 à 3.000 volts, on peut employer des isolateurs ordinaires à double cloche (fig. 269). Suivant M. Brylinski, ingénieur des postes et télégraphes, un tel isolateur ayant une épaisseur

Digitized by Google

de 12,5 m.m. au col a une résistance d'isolement de 500.000 megohms et une capacité de 0,00007 microfarad.

Cet isolateur, qui a une résistance à l'isolement très élevée quand il est sec et propre, perd cette propriété par les temps humides ou lorsqu'il est recouvert de poussière. Pour des tensions élevées, on doit employer des isolateurs à garde d'huile, dont l'idée est due à MM. Johnson et Philips.

Les figures 270, 271 et 272, indiquent les formes générales de ces isolateurs, les rainures intérieures sont remplies d'huile minérale au moyen d'un siphon, Cette huile doit être plus légère que l'eau, afin que les gouttelettes condensées tombent au fond.

Il faut nettoyer de temps à autre les rigoles et en remplacer l'huile à cause des insectes et des poussières qui tombent à l'intérieur et rendraient bientôt la surface conductrice.

M. le professeur Mengarini a employé pour l'installation de Tivoli à Rome, des isolateurs composés de deux parties A et B, figure 272. La rainure dans laquelle on place l'huile est portée par la partie inférieure, qui peut être abaissée, pour faciliter le nettoyage. En outre, comme une arête adaptée à la partie supérieure plonge dans cette rainure, les poussières et les insectes ne peuvent pénétrer dans la partie intérieure de la rigole et en rendre la surface conductrice.

Le modèle d'isolateur représenté par la figure 271 est celui qui a été employé aux expériences de Francfort, le diamètre maximum était de 20 c. m.

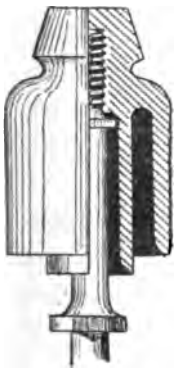


Fig. 269

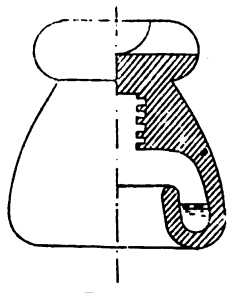


Fig. 270

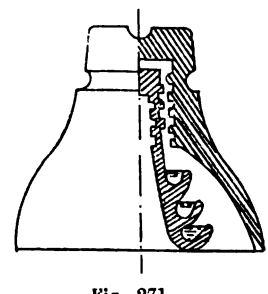


Fig. 271

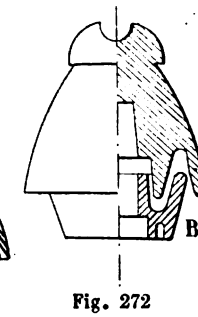


Fig. 272

Aux ateliers d'Oerlikon où ces isolateurs ont été essayés, on a constaté qu'avec un courant de 33.000 volts efficaces, l'isolement était parfait, même pendant des tourmentes de neige. Cet isolement paraît du reste être constant quelles que soient les conditions climatologiques.

Digitized by Google

Pour une ligne comportant 180 isolateurs à huile du modèle de la figure 272, M. H. Scott a constaté une résistance à l'isolement de 66.000 ohms, y compris les coupe-circuits, etc. Il a trouvé que chaque isolateur a 11,8 megohms d'isolement pour les conditions climatologiques les plus défavorables, telles que les pluies fines d'Angleterre, auxquelles les enveloppes de caoutchouc résistent difficilement.

Les isolateurs sont supportés par des tiges en fer qui servent à les fixer, soit aux poteaux, soit à des traverses fixées à ceux-ci.

Ces tiges sont fixées aux poteaux métalliques au moyen de manchons. Sur les poteaux en bois, on peut les fixer au moyen de vis, mais celà affaiblit le poteau et il vaut mieux employer des manchons.

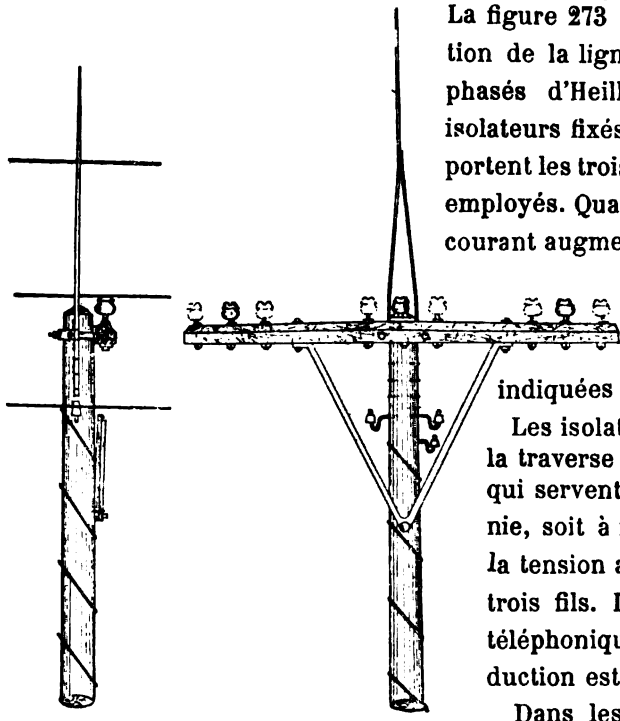


Fig. 273

La figure 273 montre l'installation de la ligne à courants triphasés d'Heilbronn; les trois isolateurs fixés sur la traverse, portent les trois fils actuellement employés. Quand la demande de courant augmentera, on placera deux nouvelles lignes à trois fils aux places indiquées en pointillé.

Les isolateurs placés sous la traverse portent trois fils qui servent, soit à la téléphonie, soit à indiquer à l'usine la tension aux extrémités des trois fils. La communication téléphonique, malgré l'induction est très bonne.

Dans les villes, les conducteurs aériens à haut potentiel doivent être soigneusement isolés et quand les portées sont un peu longues, il vaut mieux les faire supporter par des *câbles porteurs* en brins d'acier, auxquels ils sont reliés au moins de mètre en mètre. L'emploi du fil porteur a l'avantage de permettre une portée plus grande, car on peut adopter pour l'acier une résistance pratique d'au

Digitized by Google

moins 20 kgs par m.m², tandis que celle du cuivre écroui n'est au maximum que de 6 à 7 kgs. Un autre avantage est que l'effort du câble au point d'appui est diminué, il y a donc par conséquent moins de chance de rupture de l'isolant.

Il faut par contre, que le câble soit très soigneusement isolé, car les tresses et les rubans qui le relient au fil porteur sont conducteurs quand ils sont mouillés et généralement ce dernier fil est très mal isolé étant attaché à des isolateurs-arrêt, comme l'indique la figure 274.

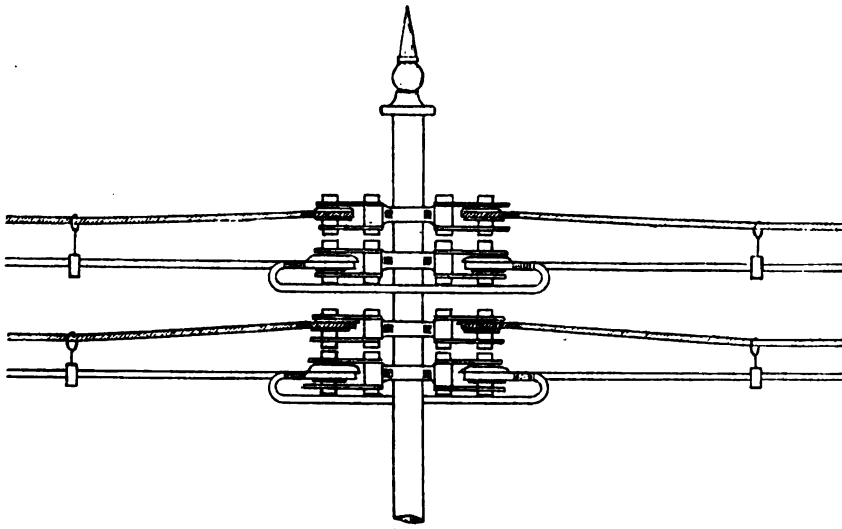


Fig. 274

Les fils nus ou isolés reposent sur les isolateurs dans la rainure supérieure, ils sont fixés par des liens reposant dans l'autre rainure.

La distance verticale entre deux fils doit être de 30 à 50 c.m.

Joints. — La jonction de deux conducteurs est une opération qui s'accomplit fréquemment et qui est très délicate. Il faut que la surface de contact soit grande et que ce dernier soit aussi parfait que possible, de manière à éviter tout échauffement.

Quand il n'y a pas d'inconvénient à ce que le conducteur soit plus gros à l'endroit du joint, on peut joindre les deux bouts du conducteur, les souder et les lier avec du fil de même matière.

Pour les conducteurs câblés dans le même cas, on peut faire le joint à l'aide d'une pièce de métal tubulaire.

Quand le conducteur doit être isolé, le joint doit avoir autant que possible le même diamètre que le conducteur. On peut alors employer:

Digitized by Google

soit le joint en *écharpe*, soit le joint *marié*, soit le joint *télescope* (1). Nous donnons ci-après la partie du règlement du board of trade anglais, relatif aux lignes aériennes. Dans ce règlement, on entend par basse tension, une tension inférieure à 150 volts, la haute tension va de 150 à 3.000 volts et la tension extra-haute est supérieure à 3.000 volts.

26. Un conducteur aérien ne doit jamais être établi à une hauteur moindre de 20 pieds (6 m.) au-dessus du sol, et de 35 pieds (10 m.) s'il traverse une rue; il ne doit jamais être à moins de 7 pieds (2m,10) de toute construction autre que son support, à moins qu'il ne pénètre dans une maison pour les besoins du service.

27. Les lignes de service par conducteurs aériens doivent être aussi directes que possible. Les isolateurs doivent être attachés solidement à un endroit du domicile du consommateur que l'on ne puisse atteindre qu'à l'aide d'une échelle ou d'un autre appareil. Depuis le point d'attache jusqu'aux fils de consommation, la ligne doit être isolée et protégée.

28. Tout conducteur aérien doit être attaché à des supports dont les intervalles ne doivent pas dépasser 200 pieds (60 m.) quand la direction est droite et 150 pieds (45 m.) quand la direction n'est pas rectiligne, ou quand le conducteur fait un angle avec l'horizontale.

29. Les supports des conducteurs aériens doivent être en matière solide et établis de façon à résister aux forces dues à la pression du vent, aux changements de direction de la ligne, aux distances inégales des supports. Les conducteurs et les fils de suspension (s'il y en a) doivent être solidement attachés à des isolateurs fixés aux supports.

Le facteur de sécurité pour les conducteurs et les fils de suspension doit être au moins de 6 et pour les autres parties de l'armature de 12, si l'on prend pour maximum possible de la pression du vent 60 livres par pied carré (environ 250 kgs. par m²), il n'y a besoin de faire aucune addition pour la surcharge que peut donner la neige.

30. Tout support, s'il est en métal, devra être mis en communication avec le sol; s'il est en bois ou tout autre matière non conductrice, il devra être protégé par un paratonnerre le suivant dans

1. Le *Traité des Câbles d'éclairage électrique* de M. Stuart. A. Russel, donne des détails très complets sur la confection des joints (Page 109 et suivantes).

Digitized by Google

toute sa longueur, le dépassant d'au moins 6 pouces (15 c. m.), mis en communication avec le sol.

31. Quand un conducteur aérien traverse une rue, l'angle que fait ce conducteur avec la direction de la rue, ne doit pas être inférieur à 60° et la longueur de la traversée doit être aussi petite que possible.

32. Quand un fil aérien appartenant aux entrepreneurs est installé de façon à croiser un autre conducteur aérien ou un fil suspendu servant à un autre usage que la distribution d'énergie, il faut prendre garde que ce fil ne vienne, par suite d'une rupture ou de toute autre cause, en contact avec le fil de l'autre canalisation.

33. Tout conducteur aérien à haute tension sera isolé sur toute sa longueur au moyen d'une matière durable et efficace approuvée par le board of trade, et sur une épaisseur d'au moins 1/10 de pouce (2,5 m. m.).

Si la différence de potentiel dépasse 2.200 volts, l'épaisseur de l'isolant ne doit pas être moindre, en pouces (25 m. m.) et en fraction de pouces, que le nombre obtenu en divisant par 2.000 le nombre qui mesure les volts. Cette couche de matière isolante sera ensuite recouverte d'une enveloppe protectrice.

Si cette enveloppe protectrice est en tout ou en partie métallique, il faut la mettre en communication avec le sol.

34. Les matières employées pour isoler un conducteur aérien à haute tension doivent être telles que leur structure physique ne soit pas altérée quand elles sont exposées à des températures variant de 0 à 150° ou à l'atmosphère des villes et des districts manufacturiers.

35. Tout conducteur aérien à haute tension doit être attaché à des fils suspendus par des attaches non métalliques, de façon que le poids du conducteur ne produise aucune tension dans le sens de sa longueur.

Les conducteurs isolés et les fils suspendus, quand ils sont attachés à des supports, ne doivent être en contact qu'avec des matières isolantes de très bonne qualité et doivent être attachés de façon que s'ils venaient à se rompre, ils ne puissent se détacher du support.

36. Les entrepreneurs seront responsables de la solidité des supports, auxquels les conducteurs seront attachés.

Chaque support sera marqué de manière à indiquer le nom du propriétaire du conducteur.

Digitized by Google

37. Les entrepreneurs doivent surveiller avec un soin particulier les conducteurs aériens, les supports et tous les appareils qui y sont réunis et ils devront les maintenir dans de bonnes conditions mécaniques et électriques.

38. Les entrepreneurs ne doivent jamais laisser un conducteur aérien installé après qu'il a cessé d'être employé à la distribution de l'énergie, à moins que l'on ne doive remettre ce conducteur en service au bout de quelque temps.

Calcul de la résistance mécanique des fils.

Le fil est soumis à deux forces uniformément réparties, l'une verticale due à son poids propre, l'autre horizontale due à la pression du vent.

Si p est le poids en kilogrammes du fil par mètre courant et P_1 la pression du vent en kilogrammes, également par mètre courant. La résultante de ces deux forces, dont la direction est inclinée, a la valeur.

$$R = \sqrt{p^2 + P_1^2}$$

Sous l'influence de cette force uniformément répartie, le fil prend la forme d'une chaînette située dans un plan faisant avec le plan vertical passant par les deux points d'appui, un angle déterminé par la relation $\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_1}{p}$.

Si P est la pression du vent en kilogrammes, s'exerçant sur une surface plane de un mètre carré de surface, d'après des expériences la pression s'exerçant sur une surface ronde sera de 0,6 P kilogrammes par mètre carré.

Si D est le diamètre extérieur du fil en m. m., la pression du vent par mètre courant sera :

$$P_1 = \frac{0{,}6\ PD}{1000}$$

La pression maximum du vent est très variable d'un pays à l'autre, le minimum que l'on puisse adopter est 100 kilogrammes par m², les règlements du board of trade anglais admettent 250 kilogrammes par m². On aura :

$R = \sqrt{p^2 + 0{,}0036\ D^2}$	pour une pression de	100	kilog.	par mètre carré
$R = \sqrt{p^2 + 0{,}00882\ D^2}$	—	—	150	—	—
$R = \sqrt{p^2 + 0{,}0144\ D^2}$	—	—	200	—	—
$R = \sqrt{p^2 + 0{,}0225\ D^2}$	—	—	300	—	—

Digitized by Google

D étant le diamètre extérieur du fil ou du câble, en m. m.

Dans le cas où les deux points d'appui sont au même niveau, prenons dans le plan incliné où est situé le fil, pour origine des coordonnées le point le plus bas de la courbe, pour axe des x la tangente (horizontale) en ce point et pour axe des y la perpendiculaire à cette ligne, désignons par a le rapport de la tension T au point le plus bas à la force R par mètre à laquelle est soumis le fil $a = \frac{T}{R}$, l'équation de la chaînette est :

$$y + a = \frac{a}{2}\left(e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}}\right)$$

Comme dans la pratique, a est généralement très grand, on peut dans le développement suivant les puissances croissantes de $\frac{x}{a}$, négliger les termes d'ordre supérieur au 2e et on obtient l'équation :

$$y = \frac{x^2}{2a}$$

qui représente une parabole.

Pour obtenir la flèche, il faut remplacer y par $\frac{L}{2}$ et on a :

$$f = \frac{L^2}{8a} = \frac{L^2 R}{8T}$$

L'effort aux appuis est :

$$T_1 = \frac{R L^2}{8f} + Rf$$

R et f, sont généralement petits, de sorte qu'avec les coefficients pratiques que l'on admet généralement on peut dans les calculs négliger R f, et admettre que $T_1 = T$, c'est-à-dire que la tension aux appuis est égale à celle au point le plus bas.

On a alors.

$$T = \frac{L^2 R}{8f}$$

La longueur totale du fil est :

$$L_1 = L + \frac{8}{3}\frac{f^2}{L}$$

Digitized by Google

Si les deux points d'attache ne sont pas au même niveau et si H_1 et H_2, représentent les hauteurs de ces points, au-dessus du sol, supposé horizontal et x_1 et x_2 les abscisses des points d'appui, par rapport au point le plus bas de la courbe, on a :

$$x_1 + x_2 = L$$

$$y_1 - y_2 = (H_1 - H_2)\frac{p}{\sin \varphi} \qquad \left(\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_1}{p}\right)$$

$$y_1 = \frac{R}{2T} x_1^2$$

$$y_2 = \frac{R}{2T} x_2^2$$

T étant la tension au point le plus bas.

Si S est la section du fil en m. m² et t la tension admissible par m. m² (t doit être pris entre $\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{6}$ de la charge de rupture, le règlement du board of trade anglais indique $\frac{1}{6}$) on aura :

$$s\,t = \frac{R\,L^2}{8f}$$

Équation qui permettra de calculer f, si on se donne L, la portée du fil. Si on obtient une longueur exagérée pour la flèche, on diminue au besoin L.

On vérifiera ensuite au moyen de la relation :

$$T_1 = \frac{R\,L^2}{8f} + R f$$

si la tension aux points d'attache n'est pas exagérée et au besoin, on diminuera L ou augmentera f.

Quand il n'y a pas de vent, la flèche est f_1 et la tension pour le minimum de température est :

$$T_1' = \frac{p\,L^2}{8 f_1}$$

qui permet de calculer T_1'.

La longueur du fil à la température minimum est :

$$L_t = L + \frac{8}{3}\frac{f^2}{L}$$

Digitized by Google

Si l'on pose le fil à une température de τ degrés au-dessus de la température la plus basse et si α est le coefficient de dilation du fil, la longueur totale à la pose devra être :

$$L_t (1 + \alpha \tau) = L'$$

La flèche f' à donner par un temps calme sera alors donnée par la relation :

$$L' = L + \frac{8}{3}\frac{f'^2}{L}$$

et la tension à donner au fil sera :

$$T_t'' = \frac{p L^2}{8 f'^2}$$

Dans le projet d'une ligne aérienne, on commencera par faire le dessin du montage des isolateurs sur les poteaux du type adopté et on calculera la flèche que prendront les fils, pour une portée que l'on se donnera, au moyen des relations indiquées ci-dessus.

On examinera si cette flèche n'est pas trop forte, c'est-à-dire si dans sa partie la plus basse le fil est encore à la hauteur voulue au-dessus du sol. En remarquant que la longueur de la flèche, comptée verticalement est, $f \cos \varphi$.

Si la flèche est trop forte, il faut ou bien diminuer la portée, ce qui augmente le nombre des poteaux et par conséquent des isolateurs ainsi que les frais de pose, ou bien augmenter la hauteur des poteaux qui doivent alors être plus forts et coûtent plus cher. Dans chaque cas, particulier, il faudra comparer les deux procédés et adopter celui dont le prix de revient est le moins élevé.

Pour bien montrer l'influence considérable du vent, prenons un exemple pratique, en admettant d'abord que cette pression est de 100 kilogrammes par mètre carré, puis ensuite de 250 kilogrammes.

Un câble en fil de cuivre nu, formé de 7 torons de 1,42 m. m. de diamètre est placé sur des poteaux écartés de 50 mètres.

Le diamètre total du câble est de 4,27 m. m. et sa section de 11,28 m. m^2, il pèse 0,10 kilogramme par m. courant. La limite de rupture du cuivre écroui employé est de 42 kilogrammes par m. m^2, et le coefficient de sécurité de $\frac{1}{6}$, c'est-à-dire que le travail maximum admissible est de 7 kilogrammes.

Digitized by Google

Dans le cas où la pression du vent est de 100 kilogrammes par m²; on a : (page 354).

$$R = \sqrt{(0{,}10)^2 + 0{,}00036\ (4{,}27)^2} = 0{,}275$$

La tension totale que le câble peut supporter est :

$$T_t = 7 \times 11{,}28 = 78{,}96 \text{ kgs.}$$

La flèche sera :

$$f = \frac{R\,L^2}{8\,T} = \frac{0{,}275\ (50)^2}{8 \times 78{,}96} = \frac{687{,}5}{631{,}68} = 1{,}09\ m$$

Valeur très admissible :

La longueur du fil à la température minimum sera :

$$L_t = 50 + \frac{8}{3}\,\frac{(1{,}09)^2}{50} = 50{,}0567\ m$$

La tension au point d'attache, par un temps calme et à la température minimum sera :

$$T = \frac{p\,L^2}{8\,f} = \frac{0{,}100 \times 2{,}500}{8 \times 1{,}09} = 28{,}67 \text{ kgs.}$$

Si l'on suppose que la température minimum est de — 20° et que l'on pose le câble à une température de + 20°, la longueur du fil à la pose devra être :

$$L' = (1 + 40\ \alpha)\ L_t$$

pour le cuivre

$$\alpha = 0{,}000017$$

$$L' = (1 + 40 \times 0{,}000017)\ 50{,}0567 = 50{,}09074$$

La flèche f' lors de la pose est donnée par la relation suivante.

$$L' = L + \frac{8}{3}\,\frac{f'^2}{L}$$

$$f'^2 = \frac{(L' - L)}{8}\ 3\ L. = \frac{(50{,}09074 - 50)\ 3 \times 50}{8} = 1{,}70$$

$$f'\ 1{,}30$$

La tension lors de la pose (par un temps calme) c'est-à-dire la tension que l'on devra mesurer au moyen du dynamomètre ou peson, sera :

Digitized by Google

$$T' = \frac{p\,L^2}{8f'} = \frac{0{,}100 \times 2{,}500}{8 \times 1{,}30} = 24{,}04 \text{ kgs}$$

Dans le cas où la pression du vent est de 250 kgs. par m², on a : (page 354).

$$R = \sqrt{p^2 + 0{,}0225\ D^2} = \sqrt{(0{,}10)^2 + 0{,}0225\ (4{,}27)^2} = 0{,}648$$

La tension totale que peut supporter le câble étant de 78,96 kgs., la flèche sera :

$$f = \frac{R\,L^2}{8\,T} = \frac{0{,}648\ (50)^2}{8 \times 78{,}96} = \frac{1620}{631{,}68} = 2{,}57$$

c'est-à-dire plus du double que dans le cas précédent.

La tension à l'attache du fil par un temps calme à la température minimum sera :

$$T = \frac{p\,L^2}{8f} = \frac{0{,}100 \times 2{,}500}{8 \times 2{,}57} = 12{,}16 \text{ kgs}$$

soit environ sept fois moindre que la limite admise.

Calcul de résistance des poteaux.

D'après les expériences du post office anglais (¹), les poteaux en bois (répondant aux conditions énoncées à la page 346) peuvent résister à un couple.

$$c = 0{,}537\ D_1^3$$

c étant exprimé en kilogrammètres quand D_1 est exprimé en c. m. D_1 étant le diamètre mesuré au ras du sol, c'est-à-dire à 1m,50 ou 2 m. au-dessus du pied.

En admettant un coefficient de sécurité de $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{6}$, on devra avoir:

$$c = 0{,}09 \text{ à } 0{,}13\ D_1^3$$

Pour les poteaux en fer on peut admettre, (coefficient de sécurité compris)

$$c = 0{,}675\ \frac{D_1^4 - d_1^4}{D_1}$$

D_1 étant le diamètre extérieur et d_1 le diamètre intérieur au ras du sol, exprimés en c. m.

Le couple total exercé sur un poteau, est dû :

1. *Câbles d'éclairage électrique* par Stuart A. Russel.

Digitized by Google

1° Au poids du fil. Le bras du levier étant la distance du point d'attache au centre du poteau.

On peut généralement négliger ce couple, parce que quand la ligne est posée en ligne droite, les isolateurs sont placés de part et d'autre du poteau et les couples se font équilibre.

Quand la ligne est en courbe, les isolateurs sont posés à l'extérieur, et le couple dû au poids du fil agit en sens inverse des autres couples, qui sont prépondérants.

2° A la pression du vent sur le poteau lui-même.

Si D_1 est le diamètre à la base, D'_1 le diamètre au sommet exprimés en c. m., H la hauteur du poteau en m., P la pression maximum du vent par m.² de surface plane, (c'est-à-dire 0,6 P par m.² de surface courbe). La surface du poteau en m.² sera :

$$\frac{D_1 + D'_1}{200} H$$

La pression totale :

$$0{,}6\ P \frac{D_1 + D'_1}{200} H$$

Le bras du levier étant très approximativement $\frac{H}{2}$ (maximum) le couple sera :

$$c_1 = 0{,}6\ P \frac{D_1 + D'_1}{400} \frac{H^2}{2} = 0{,}00075\ P\ (D_1 + D'_1)\ H^2$$

3° A la pression du vent sur chacun des fils.

La pression du vent sur un fil, en admettant que la longueur est égale à la portée (ce qui ne cause qu'une erreur absolument insignifiante) est :

$$\frac{0{,}6\ P D L}{1000}$$

D étant le diamètre extérieur du fil exprimé en m. m.

Si h est la hauteur en m. du fil au-dessus du sol, le couple sera :

$$c_2 = \frac{0{,}6\ P D L h}{1\ 00} = 0{,}0006\ P D L h$$

Dans le cas où les portées des deux côtés ne sont pas les mêmes de part et d'autre du poteau, si L_1 et L_2 sont ces deux portées, il faut prendre $L = \frac{L_1 + L_2}{2}$.

Digitized by Google

4° Quand les deux portées ne sont pas égales, il y a un couple résultant de la différence de traction des deux côtés du point d'attache. La force est égale à la différence des tensions T_1 et T_2 et le couple est :

$$c_3 = (T_1 - T_2)\, h$$

Ce dernier couple est dirigé perpendiculairement aux couples précédents, on pourra calculer le couple résultant et voir si les conditions de résistances sont satisfaites.

Dans les cas où ces conditions ne seraient pas remplies, il faudrait, soit augmenter les dimensions du poteau, soit diminuer le nombre des fils en posant une ligne auxiliaire, soit avoir recours à des haubans ou à des jambes de force.

Sur un poteau d'angle, les tensions des fils ne se font plus équilibre, même quand elles sont égales.

Si γ est l'angle des fils, T la tension d'un fil, la résultante est dirigée suivant la bissectrice, et on a :

$$T' = 2\, T \cos \frac{\gamma}{2}$$

La hauteur du fil au-dessus du sol étant h, le couple est :

$$c = T'h = 2\, Th \cos \frac{\gamma}{2}$$

Le couple dû à la pression du vent sur le fil est alors :

$$c = 0{,}0012\ P\, D\, L\, h \sin \frac{\gamma}{2}$$

Le couple dû à la pression du vent sur le poteau ne change pas.

Les haubans dans le cas où la ligne est droite, sont placés perpendiculairement à sa direction de part et d'autre. Ils sont attachés au point du poteau où agit la résultante des forces.

La résultante des forces est :

$$P_1 = 0{,}003\ P (D_1 + D_1)\ H + \Sigma\, 0{,}0006\ P\, D\, L\, h$$

Si β est l'angle que fait le hauban avec le poteau ; la tension du hauban sera :

$$t_1 = \frac{P_1}{\sin \beta}$$

Digitized by Google

Le hauban d'un poteau d'angle est placé dans le plan de la bissectrice, à l'extérieur de l'angle, il est également attaché au poteau au point où agit la résultante des forces.

Quand un poteau est placé sur un toit, on le haubanne dans trois directions au moins. Il est alors important de connaître la pression sur le toit.

Cette pression se compose du poids du poteau et de sa selle, du poids des fils ΣpL et de la pression due à la tension du hauban, qui est :

$$p_2 = t_1 \cos \beta = P_1 \operatorname{cotg} \beta$$

Quand, pour un poteau d'angle on emploie une jambe de force, elle est placée dans le plan de la bissectrice, à l'intérieur de l'angle, et fixée au poteau au point où agit la résultante des forces.

Si β est l'angle de la jambe de force avec le poteau, et P_1 la résultante des forces, le travail à la compression de la jambe de force est alors :

$$P_2 = \frac{P_1}{\sin \beta}$$

La jambe de force peut être considérée comme une pièce encastrée à ses deux extrémités, travaillant à la compression et on peut y appliquer la formule d'Hodgkinson.

On cherche d'abord la section carrée équivalente, soit b le côté de ce carré exprimé en centimètres et l la longueur de la pièce ; si P' est la résistance à la rupture en c. m. de la jambe de force, on aura :

$$P' = K \frac{b^4}{l^2}$$

K est égal à 2142 pour le sapin rouge, le sapin blanc ordinaire et le pin résineux et à 1600 pour le sapin blanc faible et le pin jaune.

Si on ne veut faire travailler la pièce qu'au dixième de sa charge de rupture, on devra diviser par 10 les valeurs données pour K.

On devra avoir :

$$P_2 < P'$$

La formule suppose que la longueur du poteau est comprise entre 30 et 45 fois le côté du carré de section équivalente, ce qui est toujours réalisé dans la pratique.

Digitized by Google

Il n'y a pas lieu de s'occuper, pour les poteaux ordinaires, de la compression due à leur poids propre et au poids des fils, car on a admis un coefficient de sécurité.

Quand on place un hauban ou une jambe de force, il faut vérifier, au moyen des formules de résistance si, au point d'application, la section du poteau est suffisante pour résister à la somme des couples agissants, que l'on détermine de la même manière que ceux agissant à la base du poteau.

Dans le cas où on emploie *un fil porteur*, comme les points de suspension sont placés à de courts intervalles, on peut admettre que la force à laquelle est soumis ce fil porteur par mètre est donnée par la relation :

$$R = \sqrt{(p + p')^2 + (P_1 + P'_1)^2}$$

p et p' étant le poids par m. courant du câble et du fil porteur, P_1 et P'_1 la pression du vent par m. courant sur ces fils.

Naturellement, dans l'évaluation des couples agissant sur le poteau, il faudra aussi bien tenir compte des fils porteurs que des câbles.

Prix de revient.

Les fils nus en cuivre reviennent à peu près à 1,60 fr. le kg., et les câbles nus à 1,80 fr.

Les fils en bronze silicieux (de 97 à 99 % de conductibilité et de 45 kg. par m. m². de résistance à la rupture), reviennent à environ 2,00 fr. le kg.

Les prix des fils en câbles isolés varient avec l'isolant employé, on les trouve facilement dans les catalogues.

Les prix des poteaux en fer sont également très variables, on doit faire un projet dans chaque cas spécial.

Pour les poteaux en bois, on peut prendre les prix suivants :

Un poteau de	6 à 7	mètres	revient à environ . .	5 fr.
—	8	—	— . .	8 fr.
—	10	—	— . .	12 à 14 fr.
—	12	—	— . .	20 fr.

Un gros isolateur ordinaire à cloche, avec sa tige, revient à peu près à 1,50 fr., les prix des isolateurs à huile doivent être demandés aux maisons spéciales qui les fournissent.

Digitized by Google

Les vis pour fixer les isolateurs sur les poteaux en bois reviennent à 0,10 fr. pièce.

Dans un terrain ordinaire, la plantation d'un poteau revient environ à 3 fr.

Pour les fils de faible diamètre, la distribution à pied d'œuvre, la pose des isolateurs et du fil reviennent environ à 25 fr. le kilomètre.

§ 9. — CANALISATIONS SOUTERRAINES.

On peut classer les canalisations souterraines en quatre grandes classes :

1° Les câbles nus posés dans des caniveaux;

2° Les câbles isolés posés dans des caniveaux;

3° Les canalisations pour lesquelles l'isolement définitif est obtenu après la pose;

4° Les câbles armés posés directement en terre.

Nous allons examiner successivement ces divers systèmes de canalisation.

1° *Câbles nus posés dans des caniveaux* (1).

Les câbles nus sont en général supportés par des isolateurs en porcelaine, portant à leur partie supérieure une mâchoire de serrage. L'isolateur est fixé à une tige en fer scellée dans le radier du caniveau

Ce système ne convient que pour les distributions à basse tension, en effet, les isolateurs doivent être placés de 15 à 28 m., les uns des autres et comme nous l'avons vu, l'adjonction de chaque isolateur diminue l'isolement de la canalisation. D'autre part, il est impossible d'employer des isolateurs à garde d'huile, car ils exigent un entretien constant.

Les caniveaux sonten ciment, en maçonnerie, en poterie ou en fonte.

Les caniveaux en ciment sont les meilleurs. Leur bon marche relatif permet de leur donner une section suffisante pour que les câbles

1. La plupart des renseignements sur les caniveaux sont empruntés à un rapport d'une commission de l'*Association amicale des Ingénieurs électriciens*, chargée de rechercher les conditions d'établissement des canalisations électriques et d'étudier les questions qui s'y rattachent. Les membres de cette commission étaient MM. Solignac, Dumartin, Clerc, Ebel, Roume et Cachéra.

Digitized by Google

soient assez éloignés les uns des autres, ils sont suffisamment monolithes pour assurer l'étanchéité dans les terrains non aqueux. Le point d'attache des supports des isolateurs peut avoir une résistance suffisante pour que l'on puisse opérer la traction des câbles.

Les caniveaux en maçonnerie doivent être rejetés à cause de leur peu de résistance à la rupture.

Les caniveaux en poterie, par suite de la difficulté de fabrication, ne peuvent avoir des sections comparables à celles des caniveaux en ciment. Comme on ne peut obtenir des tronçons de grande longueur, il y a beaucoup de joints, ce qui est désastreux pour l'étanchéité relative de la canalisation. Le scellement des tiges des isolateurs est très difficile à obtenir. Il en est de même pour les caniveaux en fonte, car si l'on veut qu'ils soient économiques, on ne peut leur donner une épaisseur de plus de 4 à 5 m. m. et dans ce cas, les points d'attache ne permettent pas une tension suffisante des câbles, lors de la pose.

Dans toutes les canalisations à caniveau, quelle que soit la matière employée et quel que soit le mode de pose des câbles, on doit éviter les points bas. Si l'on ne peut complètement les supprimer, il faut s'appliquer à ménager une évacuation facile des eaux, en installant des puisards que l'on doit pouvoir vider au besoin au moyen d'une pompe.

Il est bon également de ventiler les caniveaux, on pourrait le faire au moyen de tuyaux ayant leur prise à tous les points hauts de la canalisation.

L'orifice de ces tuyaux du côté opposé à la canalisation déboucherait, soit devant les plinthes des boutiques riveraines, soit dans des édicules disséminés sur la voie publique, appels de pompiers, cadres, annonces, kiosques, urinoirs, candélabres, etc. . . Cet orifice devrait naturellement être protégé de la pluie.

En Amérique on ventile les caniveaux par compression d'air.

2° *Câbles isolés posés dans des caniveaux.*

On peut les classer en deux catégories.

a) Les câbles posés à demeure. Pour les poser ou les retirer on doit fouiller le sol.

b) La canalisation est disposée de telle sorte que pour enlever les câbles, il suffit d'ouvrir des regards, disposés à des places convenables, *c'est le système à tirage.*

Digitized by Google

a) Câbles isolés placés à demeure dans des caniveaux.

Les caniveaux peuvent être comme nous l'avons vu, en ciment, en maçonnerie, en poterie, en métal, ou en bois.

Les câbles isolés peuvent être posés sur des espèces de rateliers installés dans les caniveaux, que l'on recouvre ensuite. Le caniveau peut aussi, avant d'être recouvert, être rempli d'une substance quelconque, isolante ou non.

A l'usine municipale des Halles (fig. 275) les câbles sont disposés dans des conduites en béton et y sont maintenus par des moulures en bois.

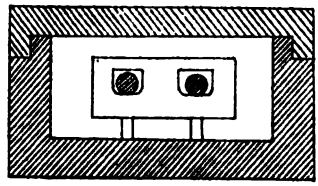


Fig. 275

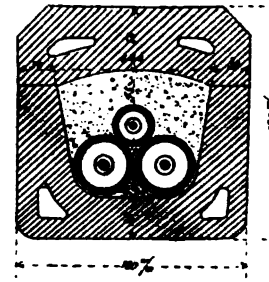


Fig. 276

Le béton est constitué de 4 parties de sable, une de ciment Portland et une de chaux hydraulique.

A Rome, les conducteurs concentriques du système Siemens sont disposés dans des boites de bois remplies de ciment.

A Zurich, on a employé tant pour la pose du réseau primaire, avec câbles concentriques du système Berthoud Borel non armés, que pour la pose des circuits secondaires à 3 fils, constitués par 3 câbles simples des mêmes constructeurs, des caniveaux en terre cuite. Ces caniveaux ont 0^{m},80 à 1 m. de longueur, ceux employés pour les circuits secondaires ont une section de 180 sur 180 m. m. (fig. 276).

Ces caniveaux après la pose des câbles sont remplis de sable fin, ce qui égalise la pression. Sous les rues les caniveaux sont posés à une profondeur de 60 c. m. mesurée au-dessus du couvercle, sous les trottoirs on a réduit cette profondeur à 50 et même 40 c. m.

Les câbles du système Ferranti sont posés de la manière suivante: Les tronçons étant construits comme nous l'avons vu (page 343), on les place sur un tour et une des extrémités est tournée en forme de cône, comme le montre la figure 277, tandis que l'autre extrémité est tournée en forme de cône pouvant pénétrer dans le premier.

Les tubes intérieurs de deux tronçons consécutifs sont reliés au

Digitized by Google

moyen d'un mandrin en cuivre, retenu par des épaulements du tube intérieur. Quand ce mandrin est posé, on approche les deux tronçons et on forme le joint à la presse hydraulique.

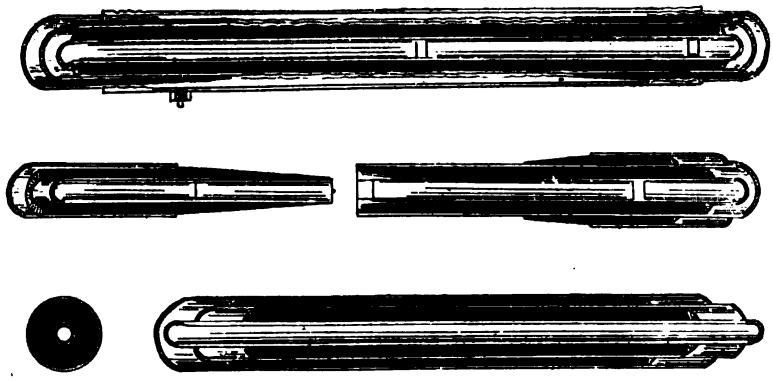


Fig. 277

Les deux conducteurs extérieurs sont reliés par un manchon en cuivre, dans lequel au moyen d'un outil spécial, on pratique des rainures lui faisant prendre une forme ondulée, ce qui assure bien le contact.

La partie découverte est ensuite enroulée de papier non collé, imprégné de cire et la jonction entre les deux armatures de fer, se fait au moyen d'un manchon de fer que l'on ondule de la même manière que le manchon reliant les conducteurs extérieurs.

On remplit ensuite le vide au moyen de cire fondue que l'on introduit par un petit trou ménagé dans le manchon de fer, ce trou est ensuite bouché au moyen d'une vis.

Les câbles sont ensuite placés dans des boîtes en bois, qui lorsqu'une certaine longueur de conducteurs est posée, sont remplies de poix.

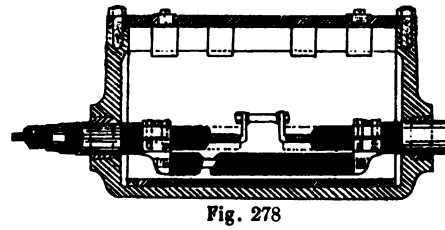


Fig. 278

D'intervalle en intervalle sont intercalées des boites à regard en fonte, dans lesquelles les câbles pénètrent par des sortes de presse-étoupes. Dans ces boites, le joint n'est pas fait à la manière ordinaire, mais comme l'indique la figure 278. On peut donc facilement, lorsqu'on recherche un défaut, séparer les diverses portions de câbles pour faire les essais.

Digitized by Google

Le joint entre deux tubes consécutifs est à peu près continu et il faut une force énorme pour les séparer. Malgré le grand nombre de joints, la résistance du câble après pose est à peu près la même que s'il était continu. On pourrait cependant craindre qu'à la longue, les vibrations ne produisent des fissures aux joints, ce qui entraînerait des décharges disruptives.

Dans tous les systèmes de pose de câbles isolés, il vaut mieux employer des boites de jonction que de faire des joints. Quand on veut faire un joint, on a recours à des ouvriers spéciaux envoyés par le fabricant de câbles, qui sont habitués à ce travail délicat.

b) ***Système à tirage.***

Dans ce système on peut, soit retirer le câble après la pose, soit quand le besoin s'en fait sentir, augmenter la section utile des conducteurs, en introduisant de nouveaux câbles.

Quand on emploie des câbles flexibles de faible section, on peut diviser le caniveau, au moyen de cloisons verticales et horizontales en compartiments, dans lesquelles on glisse de nouveaux câbles.

A tous les changements de direction, ou a tous les cent mètres environ en ligne droite, on a soin de disposer des regards qui peuvent servir de boîtes de jonction.

On dispose lors de la pose des caniveaux, dans chaque compartiment, une corde qu'on laisse à demeure et qui sert ultérieurement à tirer le câble que l'on veut placer.

Dans le système *Johnston* le caniveau est en fonte, formé de deux pièces à emboîtement, divisé par des cloisons verticales et horizontales. Les emboîtements extérieurs sont pourvus de joints à rainure que l'on remplit de mastic de plombier.

Dans le système *Callender Weber*, les caniveaux sont constitués par des blocs de béton bitumé, percés de canaux dans lesquels on place les câbles. Les joints sont faits au moyen de bitume liquéfié ; on a soin de remplir les canaux par où doivent passer les câbles avec des mandrins que l'on retire ensuite.

Dans le système *Dorsett*, les caniveaux sont en coaltar, poix et sable fin, ces blocs sont également percés de trous. Pour faire les joints, on place dans les trous, entre les deux blocs, des tubes de papier et on emploie du mastic mou.

En Amérique, on emploie beaucoup des tubes en bois, de forme

Digitized by Google

carrée, percés d'un trou central. On peut réunir plusieurs de ces tubes en bois par un cadre.

Le bois est créosoté, aussi faut-il avoir soin de ne pas employer des câbles avec enveloppe de plomb pur, qui est rapidement attaqué par la créosote. Il faut avoir soin de mélanger au plomb une certaine quantité d'étain.

On peut également placer les câbles dans des conduites en fonte ou en fer, dont les joints sont exécutés comme ceux des canalisations d'eau.

On peut, lors de la pose, placer plusieurs conduites ou installer des conduites plus larges, dans lesquelles on peut plus tard glisser des conducteurs supplémentaires.

Ces conduites ont une section circulaire ou elliptique, le diamètre intérieur varie de 5 à 10 c. m.

Le prix des conduites en fonte est approximativement de 2 francs par mètre, pour un diamètre intérieur de 5 c. m., de 3 francs pour un diamètre de 7,5 c. m., et de 4 francs pour un diamètre de 10 c. m.

3° *Canalisations pour lesquelles l'isolement définitif est obtenu après la pose.*

On peut compléter l'isolement des câbles après la pose, ces derniers sont alors simplement garnis de tresses ou de coton, pour les empêcher de se toucher.

Dans le système de la *Callender Company*, les câbles sont disposés dans des caniveaux en fonte d'environ 15 c. m. de largeur et 10 c. m. de hauteur (fig. 279). Ils sont portés par des barres transversales en bois, placées à 50 c. m. les unes des autres. Quand on a placé une longueur suffisante de câbles, on remplit la boîte avec de la bitite ou de l'asphalte et on recouvre le caniveau.

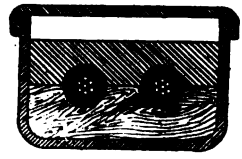


Fig. 279

Dans le système *Brooks*, les câbles entourés de jute, de coton, de chanvre ou d'un léger isolement servant à les empêcher de se toucher entre eux ou de toucher aux tuyaux, sont introduits dans des tuyaux en fer ou en fonte.

L'ensemble des tuyaux et des boîtes de jonction est rendu complètement étanche, puis on y coule une matière isolante liquide, qui ordinairement est une huile résineuse lourde, sirupeuse, qui

Digitized by Google

s'échappe moins facilement des tuyaux que l'huile minérale ordinaire.

A la partie la plus élevée de la canalisation est installé un réservoir, qui contient de l'huile et assure la provision de l'ensemble des tuyaux.

L'isolement ainsi obtenu est excellent, il se reforme de lui-même, si une décharge disruptive vient à se produire, mais par contre, lorsque la canalisation a un certain développement, l'étanchéité est difficile à obtenir.

On ne peut employer ce procédé lorsque la canalisation est établie dans un terrain en pente, car la pression pourrait être trop considérable dans les parties les plus basses.

4° Câbles armés posés directement en terre.

Les câbles sont placés dans une tranchée, sur une couche de sable de 10 à 15 c. m. d'épaisseur et recouverts d'une seconde couche de sable de 15 à 20 c. m. d'épaisseur, sur laquelle on dispose, soit des planches, soit des poteries, soit un treillis en fil de fer galvanisé, afin de prévenir les ouvriers qui, pour une cause quelconque, viendraient à fouiller le sol, de la présence du câble. On remblaie ensuite la tranchée et rétablit au besoin le pavage.

Le fond des tranchées doit être légèrement en pente et si le sol n'est pas perméable, les eaux doivent aboutir à des puits perdus.

Ce système est employé au secteur des Champs-Elysées, M. Dieudonné le décrit ainsi qu'il suit dans un article paru dans l'*Electricien* du 18 mars 1893 :

Méthode de pose. — Les câbles sont transférés aux chantiers de pose, par longueur variant de 100 à 200 mètres, suivant leur section.

La bobine qui les porte est disposée sur une plaque tournante, pivotant sur la plate-forme du véhicule de transport, de façon que le déroulement ait lieu dans un plan horizontal. Cette opération s'accomplit fort simplement ; le chariot placé près de la tranchée ouverte dans le trottoir, des ouvriers y tirent le câble qui se déroule sous leur effort de traction. Il est couché vers un lit de sable à une profondeur de 0,60 m. environ. A la traversée des chaussées, les câbles sont enfilés dans des tuyaux de fonte de 12 c. m. de diamètre.

Pour les mettre en dehors des atteintes des coups de pioche ad-

Digitized by Google

ventices, on étend sur eux une assise de bardeaux en terre cuite et à quelques centimètres au-dessus de ce toit tutélaire, est noyé dans le sol un treillage en fil de fer à larges mailles.

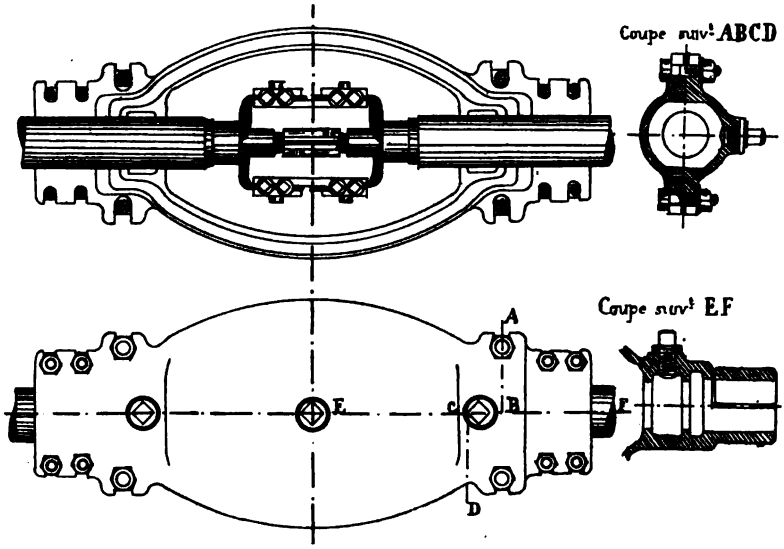


Fig. 280

Raccords. — Le jonction des deux bouts consécutifs d'une ligne s'opère au moyen d'une boite de jonction en deux parties, dont la figure 280 montre une vue en plan, le couvercle ôté, et une autre avec le couvercle replacé, ainsi que quelques détails de construction.

Les extrémités du câble sont dénudées, les brins correspondants sont emprisonnés dans des mâchoires en laiton et fortement serrés par des vis; ensuite le couvercle est remis en position, boulonné et la boite est remplie de matière isolante introduite par trois tubulures.

Branchements. — Un même type d'appareil sert à brancher un feeder sur un autre, ou un câble de distribution sur un feeder.

C'est une boite en forme de T (fig. 281), dans laquelle les fils des trois câbles sont réunis par des pièces en laiton spéciales et le tout est empâté de substances isolantes.

Toutes ces boites, tant celles de jonction (raccords) que celles de dérivation (branchements) sont noyées dans du brai gras, afin de mettre obstacle à l'introduction de l'humidité par les joints.

Digitized by Google

Lors de l'établissement des canalisations, on a constaté les isolements kilométriques suivants, après pose :

Entre les deux âmes.	4,700 megohms
Centre et terre	8,500 —
Concentrique et terre.	2,600 —

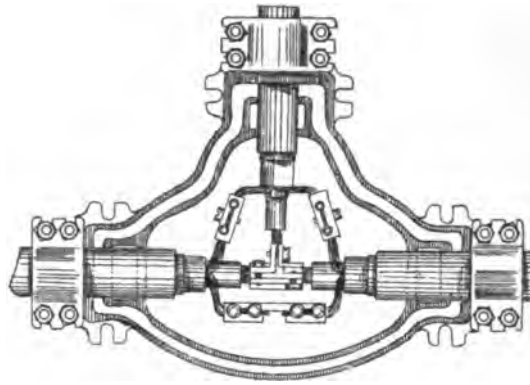


Fig. 281

Prix de revient des canalisations souterraines. — Les dépense d'affouillement, de remblayage, de repavage, etc., de la fourniture et de l'installation des boîtes de jonction, s'élèvent à environ 9 francs par mètre courant.

La canalisation avec tuyaux de fonte, pour deux fils, revient en moyenne par mètre courant (voir page 344), s étant la section du conducteur en mm. :

Pour la basse tension à $(13 + 0{,}10\ s)$ francs
Pour la haute tension à $(13 + 0{,}19\ s)$ francs

Une canalisation avec deux câbles armés posés en terre revient à :

$(12{,}75 + 0{,}135\ s)$ francs par mètre courant

M. Crompton a donné dans le tableau suivant (1) les prix d'établissement d'un décamètre de conducteur double pour circuits à haute tension posés sous les trottoirs de Londres :

1. Eric Gérard, *Leçons sur l'Electricité*, 2e volume, page 365.

Digitized by Google

	7 fils cordés	19 fils cordés	19 fils cordés	19 fils cordés	37 fils cordés	2 cordes de 37 fils	4 cordes de 37 fils	6 cordes de 37 fils
Sections en m m.². .	14,6	50	104	161,25	322	645	1290	1935
Prix du cuivre à 1fr.50 le kg.	4,73	16,20	34,60	51,40	118,00	216,00	408,00	614,00
Prix de l'isolement. .	12,30	27,80	68,00	98,20	194,00	388,00	775,00	1135,00
Enveloppe de bitume et ciment, main-d'œuvre de pose, tranchée et réfection du trottoir, regards et boîtes de distribution. Ingénieurs et surveillants.	130,00	145,00	170,00	170,00	194,50	233,00	370,00	410,00
Dépense totale par décamètre	147,03	189,00	272,60	319,60	506,50	837,00	1553,00	2229,00

§ 10. — Canalisations a l'intérieur des édifices

Les lampes à incandescence les plus ordinairement employées, fonctionnent sous une différence de potentiel efficace de 50 ou 110 volts, la canalisation desservie par le transformateur de la maison ou de la sous-station (voir chapitre VII) est à deux ou trois fils. On prend comme nous le verrons au paragraphe suivant, les précautions nécessaires pour éviter l'introduction de la haute tension dans le circuit secondaire.

Tous les fils employés sont soigneusement isolés, ils doivent être assez souples pour pouvoir être courbés presque à angle droit sans rupture, soit du conducteur, soit de l'isolant.

A cet effet, dès que le conducteur a une section assez grande, on doit le former de plusieurs fils et l'isolant doit être du caoutchouc. A cause des efforts mécaniques à supporter, on n'emploie pas de fils ayant un conducteur unique d'un diamètre inférieur à 9 dixièmes de millimètre.

Digitized by Google

Les conducteurs, autant que possible, ne doivent jamais servir à suspendre une lampe ou aucun poids. L'emploi de deux fils sous une même enveloppe (excepté pour les câbles sous plomb) n'est guère à autoriser que pour la jonction des lampes portatives à la canalisation et dans ce cas l'isolement entre les deux conducteurs doit être très élevé.

La section des fils desservant une lampe ou un groupe de lampes est calculée de manière que la tension efficace aux bornes de la lampe ne diffère pas plus de 2 à 3 % de la tension normale. On doit vérifier ensuite au moyen de la formule de Kennelly (page 312), si cette section n'entraîne pas une élévation de température inadmissible et au besoin on devra l'augmenter.

L'emploi de la formule de Kennelly, n'est pas très commode, aussi tant que la section du fil ou du câble ne dépasse pas 200 m. m.² peut-on appliquer la règle suivante : la densité du courant ne doit pas dépasser 1,5 ampère par m. m.².

Les conducteurs peuvent être :

1° Apparents (posés avec isolateurs);

2° Placé dans des moulures en bois ;

3° On peut employer des câbles sous plomb fixés aux murs ;

4° Placés dans des tuyaux (système à tirage) :

1° *Conducteurs apparents* ;

Les conducteurs isolés sont maintenus par des poulies en porcelaine, ou de petits isolateurs à oreilles.

Dans ce système, l'isolement obtenu est excellent, mais l'aspect de l'installation est disgracieux.

2° *Conducteurs posés dans des moulures :*

Ce système de pose ne doit être employé que dans les endroits peu humides.

Les moulures doivent être en bois dur et bien sec et ne présenter aucune discontinuité aux raccords.

Dans les endroits bien secs, les moulures peuvent être fixées directement sur le mur au moyen de vis et de tampons en bois.

Il vaut cependant mieux employer toujours le système suivant, indispensable quand les murs sont un peu humides.

Les moulures sont placées à environ 15 m.m. de la paroi et y sont

Digitized by Google

fixées par l'intermédiaire de taquets en bois dur, bouilli dans de la paraffine cloués sur le mur ou scellés dans celui-ci.

Les têtes des clous fixant les taquets à la paroi, doivent être logées dans des rainures ménagées à cet effet.

La moulure est fixée sur les taquets, au moyen de vis, dont la pointe ne doit pas atteindre le mur. Entre la moulure et le taquet, on interpose une petite lame de caoutchouc.

Aux angles, dans toutes les moulures on doit réserver une certaine courbure, afin d'éviter toute déchirure, soit de l'isolant, soit du cuivre.

La moulure n'est cependant pas un excellent moyen de protection des câbles, ceux-ci peuvent-être détériorés par l'enfoncement d'un clou, etc... elle n'est absolument qu'un moyen de protection mécanique, car elle s'imprègne très facilement d'humidité, surtout quand elle n'est pas apparente.

3° *Emploi des câbles sous plomb.*

On peut employer des câbles sous plomb, que l'on fixe à la paroi, au moyen de crampons, comme les tuyaux à gaz, en ayant soin de ne pas détériorer l'enveloppe. Ces conducteurs sous plomb, peuvent être constitués, soit par des fils indépendants, soit par des câbles concentriques, soit également par deux câbles non concentriques placés dans la même gaîne. L'avantage de ce système est que l'on peut très facilement dissimuler les conducteurs sous la tapisserie, etc.;

4° *Conducteurs posés dans des tuyaux* (système à tirage).

On peut employer des tubes en fer munis de petites brides de raccord spéciales, et on peut alors retirer les câbles avec facilité, soit pour les examiner, soit pour les remplacer.

En Amérique, la *Interior conduit company*, emploie des tuyaux et des boîtes de raccord en papier, du système *Bergmann* (concessionnaire en France, la maison Sée, de Lille).

Le papier est vulcanisé, les tubes ont l'aspect de tubes en ébonite, et sont imperméables. Ils sont peu combustibles et lorsqu'ils sont entourés d'une gaîne de métal ils deviennent complètement incombustibles. A l'encontre des moulures, ces tuyaux concourent à l'isolement (un fil de cuivre nu placé dans ces tubes a accusé une résistance de 170 megohms par kilomètre). Les tubes ont 3 mètres de longueur; leur diamètre intérieur varie de 7 à 16 millimètres, leur

Digitized by Google

épaisseur est d'environ 2, 5 m. m., ils sont jonctionnés au moyen de manchons en cuivre sertis avec une pince spéciale. Le système entier est étudié dans tous ses détails pour tous les cas possibles, les tubes se ploient en courbe, en baïonnette, etc.

Les tubes sont fixés aux murs ou aux plafonds, au moyen de boucles de cuivre mince, ou de fil de fer recuit, clouées par le milieu au mur ou au plafond et ensuite nouées autour du tube.

Pour les conduites maîtresses, on met un fil d'aller et un fil de retour, chacun dans un tube spécial.

Pour les circuits secondaires on emploie ordinairement un fil à deux conducteurs concentriques.

Pour passer les câbles dans les tubes, on se sert d'un ruban d'acier terminé à un bout par une boule et à l'autre par un œillet. On passe d'abord le ruban dans les tubes, on attache le conducteur à l'œillet et on tire le tout.

Les dérivations se font sans soudure, par simple serrage de vis sur des plaques de porcelaine. Toutes les plaques, interrupteurs et coupe-circuits sont logés dans des boîtes de matière semblable à celle des tubes, munies de tubulures que l'on jonctionne avec les tubes au moyen de manchons en cuivre. Tous les couvercles de boîtes sont interchangeables.

Voici, d'après les données de la Société générale d'électricité de Berlin, le prix de revient de l'installation d'une lampe à incandescence de 16 bougies, dans divers locaux.

DÉSIGNATION DES LOCAUX	PRIX DE REVIENT	
	de la canalisation	de la lampe y compris globes, abat-jour, etc.
Imprimeries, Filatures.	7fr,50 à 10fr,00	2fr,50 à 3fr,50
Ateliers de menuiserie, etc.	9 ,00 à 12 ,50	2 ,50 à 4 ,00
Fabriques de machines.	10 ,00 à 15 ,00	2 ,50 à 4 ,00
Distilleries, brasseries	11 ,00 à 18 ,00	4 ,00 à 6 ,50
Fabriques de sucre, de papier. . . .	11 ,00 à 18 ,00	4 ,00 à 6 ,50
Fabriques de produits chimiques, teinturies, etc.	12 ,50 à 18 ,00	6 ,00 à 8 ,00
Maisons d'habitation et de commerce . .	11 ,00 à 17 ,00	7 ,50 à 25 ,00
Restaurants, hôtels	11 ,00 à 22 ,50	10 ,00 à 31 ,00
Théâtres, concerts	10 ,00 à 18 ,00	10 ,00 à 31 ,00

Digitized by Google

§ 11. — MESURES DE PRÉCAUTION.

Dans une remarquable conférence faite à la Société internationale des électriciens (1), M. d'Arsonval a examiné l'action du courant alternatif sur l'organisme.

L'action du courant alternatif dépend de la forme de l'onde électrique, du potentiel ou plutôt de l'intensité du courant qui traverse le corps et de la fréquence.

Le premier point a été démontré par M. d'Arsonval de la manière suivante, il a trouvé qu'à voltage égal, un alternateur Siemens est plus dangereux qu'un alternateur Gramme. En effet, en faisant passer sous une différence de potentiel de 300 volts, le courant de la tête à la queue d'un chien, quand l'intensité efficace du courant atteint un ampère, celui provenant d'un alternateur Siemens entraîne la mort de l'animal, tandis qu'il n'en est pas de même pour celui de l'alternateur Gramme. L'onde électrique de l'alternateur Siemens, dont l'induit ne contient pas de fer, est beaucoup plus brusque et plus brutale que celle de l'alternateur Gramme, dont l'induit contient du fer et dans lequel la s. i., beaucoup plus considérable, atténue les variations brusques.

Dans le cas de *contact peu prolongé* avec une source à haut potentiel, *la mort n'est qu'apparente,* il suffit de *pratiquer la respiration artificielle,* car il y a simplement arrêt de respiration comme dans le cas de submersion. (Voir § 12).

Quand le contact est plus prolongé, la mort est due à une élévation de la température du corps, qui, comme l'a montré Claude Bernard, amène la coagulation des fibres musculaires du cœur. Si, par exemple, on refroidit le corps de l'animal soumis à l'expérience de manière que la température ne s'élève pas, ce dernier ne meurt pas.

L'échauffement considérable par l'électrisation, n'est pas dû seulement, comme on pourrait le croire à la résistance du corps, s'échauffant comme un conducteur, conformément à la loi de Joule, il est dû presque uniquement à la contraction violente de tous les muscles.

1. Sur les effets physiologiques de l'état variable en général et des courants alternatifs en particulier. *Bulletin* n° 87, avril 1892.

Digitized by Google

Lors d'une électrocution en Amérique, on a constaté que la température du corps du supplicié était de beaucoup au-dessus de la normale. On avait fait passer un courant de trois ampères sous 15.000 volts pendant 50 secondes, soit 4.500 watts ou une calorie environ par seconde. Or 50 ou 60 calories n'élèvent pas la température d'un homme du poids moyen de 75 kilogrammes, de plus de un degré.

M. d'Arsonval a constaté qu'en augmentant graduellement la fréquence, les phénomènes d'excitation neuro-musculaire vont en augmentant jusqu'à 2.500 ou 3.000 alternances à la seconde, qu'ils restent stationnaires entre 3.000 et 5.000 et vont ensuite en décroissant. Un courant de 3.000 alternances est donc plus douloureux qu'un courant de 10.000 et qu'un courant de 150 et même de 40 (avec la machine Gramme).

On peut donner de ce fait, comme le dit M. d'Arsonval, deux explications, l'une physique bien démontrée, l'autre physiologique hypothétique.

La première est que la distribution du courant alternatif est tout autre que celle du courant continu et qu'il se porte de plus en plus à la surface du conducteur à mesure que la fréquence augmente.

La seconde hypothèse est que les tissus ne sont plus excitables par des chocs excessivement rapides.

Avec un nombre d'alternances de 6 à 700.000 par seconde. M. d'Arsonval a pu allumer, en faisant passer le courant à travers son corps, jusqu'à sept lampes de 155 volts et $\frac{1}{2}$ ampère.

Un semblable courant venant d'un alternateur à fréquence ordinaire suspendrait instantanément la respiration et provoquerait de violentes contractions dans tous les muscles.

On a procédé à de nombreuses expériences pour déterminer l'intensité efficace traversant le corps humain, qu peut être dangereuse, avec de faibles fréquences.

MM. Lawrence et Harries ont trouvé que la secousse commençait à devenir douloureuse pour une intensité efficace de 0,004 ampère.

M. Swinburn estime que l'intensité dangereuse est de 0,014 à 0,03 ampère suivant les sujets.

On peut donc admettre qu'une intensité efficace supérieure à 0,01 ampère est dangereuse.

Digitized by Google

La résistance du corps humain au passage du courant est très variable, elle peut atteindre 6.000 ohms, cependant, si on ne tient pas compte de la résistance exceptionnelle de certains sujets, elle est en moyenne de 1.000 ohms.

Il faut donc que l'isolement d'un câble réponde à la condition de ne laisser passer qu'un courant de 0,01 ampère quand une personne le touche.

Si E est la tension efficace, R la résistance d'isolement et r la résistance du corps humain, on devra avoir :

$$E = (R + r)\ 0{,}01$$
$$R = 100\ E - r = 100\ E - 1000$$

Pour :

E = 100 Volts on a	R = 9.000 ohms
E = 1,000 V. —	R = 99.000 ohms
E = 2,500 V. —	R = 249.000 ohms
E = 10,000 V. —	R = 999.000 ohms

En général, si ces conditions sont satisfaites, une personne ne peut courir aucun danger, car il est bien évident que dans le cas d'un contact accidentel, la résistance au point de contact est bien plus grande que celle obtenue dans les expériences où le sujet, sur lequel on expérimente, tient les électrodes des deux mains.

Dans le cas des courants alternatifs, il existe une autre cause de danger que celle d'un isolant défectueux, ce danger provient de la capacité.

Nous avons vu dans la partie théorique (1er volume, page 122 et suivantes), que les câbles ont deux sortes de capacité.

1° La capacité entre les deux conducteurs, que M. Claude appelle la *capacité directe*, qui n'intervient pas au point de vue de la sécurité.

2° La capacité de chacun des conducteurs, par *rapport à la terre*, qui est la cause du danger.

Quand le câble est parcouru par un courant continu, l'isolement à la terre peut être de plusieurs milliers de megohms, mais il n'en est pas de même, dans le cas où le câble est parcouru par un courant alternatif.

En effet, la résistance de l'isolant n'intervient pas dans le cas où il y a de la capacité, on n'a plus affaire qu'à la résistance apparente

Digitized by Google

qui est, si k représente la pulsation du courant et c la capacité par rapport à la terre, égale à $\frac{1}{k\,c}$ (1er volume page 40).

La résistance apparente peut être augmentée :

1° En diminuant k, mais on sait que le nombre de périodes ne peut être abaissé au-dessous d'une certaine valeur, dans le cas d'éclairage.

2° En diminuant c. Pour cela on peut, par exemple, placer le câble dans un tuyau métallique de grand diamètre, d'autant plus que, comme le dit M. Claude, la constante diélectrique de l'air n'est que le tiers ou le quart de celle des isolants.

C'est cette cause qui rend au point de vue de la sécurité, les canalisations aériennes préférables.

Ces deux procédés ne peuvent du reste être employés pour des distributions existantes.

Le procédé indiqué par M. Claude (1), pour diminuer l'intensité du courant qui traverse le corps d'une personne mettant le câble à la terre, consiste à neutraliser les effets de la capacité par rapport à la terre au moyen de la s. i.

Soient A et B deux câbles aller et retour (fig. 282), si par exemple,

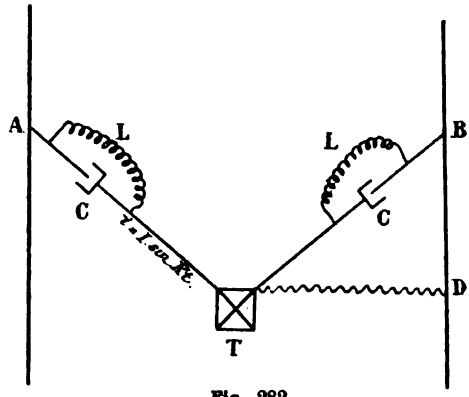


Fig. 282

une personne relie le câble D à la terre en T D, le courant qui traverse son corps ira se fermer à l'autre pôle en suivant T A. Pour diminuer l'intensité maximum de ce courant, M. Claude propose de placer en dérivation une s. i. L.

1. *Bulletin de la Société internationale des électriciens*. N° 163, décembre 1893.

Digitized by Google

En effet, si $i = I \sin kt$ représente la valeur instantanée de l'intensité du courant traversant le corps, on est dans le cas des dérivations traité au chapitre 2 § 8 du 1er volume (page 58). En négligeant la résistance de la terre et celle de la personne et en admettant que la s. i., placée en dérivation a une résistance nulle, il faudra prendre (1er volume, fig. 12, page 63) :

$$r_1 = o \qquad r_2 = o \qquad R = o \qquad \lambda_1 = L$$
$$\lambda_2 = -\frac{1}{k^2 C} \qquad \lambda = o$$

Et la relation de la page 65 donne :

$$E_a^2 = I^2 \frac{k^2 L^2 \frac{1}{k^4 C^2}}{k^2\left(L - \frac{1}{k^2 C}\right)} = I^2 \frac{L^2}{k^2 C^2 \left(L - \frac{1}{k^2 C}\right)^2}$$

$$E_a = I \frac{L}{kC\left(L - \frac{1}{k^2 C}\right)}$$

$$I = E_a \frac{kC\left(L - \frac{1}{k^2 C}\right)}{L}$$

E_a étant la valeur maximum de la tension et I la valeur maximum de l'intensité du courant qui traverse la personne.

On voit que théoriquement, si $L = \frac{1}{k^2 C}$, aucun courant ne traversera le corps de la personne, mais pratiquement, on ne peut avoir une s. i. sans résistance, de sorte que le courant aura toujours une certaine intensité.

M. Claude, à l'usine des Halles (où l'isolement apparent en marche tombe à 2.000 ohms) n'a pu que doubler cet isolement, car il n'avait à sa disposition, comme appareils à s. i. que des transformateurs Ferranti. Dans le cas où l'on peut disposer des bobines à réaction, l'isolement apparent peut être considérablement augmenté et être rendu par exemple vingt-cinq fois plus grand.

M. Claude termine ainsi sa conférence :

« D'ailleurs, dans tout ce qui précède, nous avons supposé que la résistance intercalée dans les circuits des condensateurs était nulle, ce qui n'est pas exact, puisque cette résistance comprend la résis-

Digitized by Google

tance de la terre. Il vaudra donc mieux pour le bon fonctionnement du système, brancher de distance en distance des s. i. partielles, surtout si la ligne est très longue et constituée par des câbles non armés, on obtiendra ainsi le montage de la figure 283, dont on peut remarquer l'analogie avec celui proposé pas le professeur Sylvanus Thomson pour la téléphonie transatlantique. Le point à relier à la terre dans chacune des bobines à réaction est d'ailleurs celui qui les divise en deux parties inversement proportionnelles aux capacités des deux câbles. »

« En particulier dans le cas de câbles concentriques, qui est en pratique l'un des plus importants, le danger du contact est évidemment localisé sur le câble du milieu et il suffit, pour améliorer les conditions de sécurité, d'établir une s. i. convenable entre le câble extérieur et la terre (fig. 284). »

« Il est un point que jusqu'ici, j'ai laissé de côté et qu'il importe d'examiner. J'ai fait remarquer que l'adjonction de la s. i. avait pour but non de modifier la valeur de la différence de potentiel entre chaque câble et la terre, mais de rendre cette différence de potentiel instable et réductible à une faible valeur, dès qu'un contact avec le corps humain se produit. Il n'en est pas moins vrai, que le potentiel auquel est soumis le corps variant de 1.200, par exemple, à 0 tandis qu'entre T et A (fig. 282) il croît de 1.200 à 2.400, nous avons ici un régime variable. Par conséquent, nous devons tenir compte du terme, qui, dans l'intégration des équations différentielles relatives à

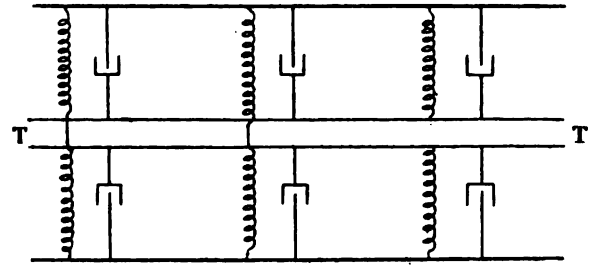


Fig. 283

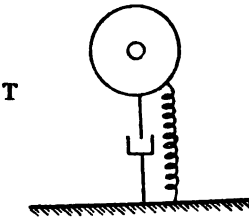


Fig. 284

l'introduction de la s. i. et de la capacité, représente l'établissement du régime et qui est pour la s. i. de la forme :

$$I_t = \frac{A}{e^{\frac{Rt}{L}}}$$

Digitized by Google

et pour la capacité :

$$I_t' = \frac{A_2}{e^{\frac{t}{cR}}}$$

expressions dans lesquelles peut intervenir la résistance du corps humain, variable avec chaque individu. On voit que le régime s'établit d'autant plus vite, pour la s. i. que R est plus grand ; tandis que c'est le contraire pour la capacité et que par conséquent il ne doit plus y avoir à chaque instant compensation exacte, entre les actions de la capacité et celles de la s. i. ; le corps doit donc être le siège d'un courant pendant la période variable. Mais en mettant les choses au pis, c'est-à-dire en supposant qu'on établisse le contact du corps au moment précis où la f. e. m. est maximum et en négligeant l'action en sens inverse de la s. i., on voit que le corps humain est soumis à la décharge d'une capacité égale à celle de la ligne, chargée à un potentiel égal à la moitié de la différence de potentiel maximum, Cette décharge peut elle encore être dangereuse ? En analysant ce qui peut se produire, on est amené à conclure par la négative. En effet, les accidents dus à l'électricité sont de deux natures : ceux qui résultent *de chocs* proprement dits, provenant par exemple de décharges de condensateurs puissants chargés aux potentiels statiques : ceux qui proviennent du passage de *courants permanents* à travers le corps et produisent la mort, par la cessation prolongée des fonctions du cœur et des poumons. Il est tout d'abord évident que nous n'avons même pas à considérer ici ce dernier mode d'action puisque la période variable correspond tout au plus à une petite fraction de seconde. D'autre part, au point de vue du choc, on reçoit très fréquemment et sans inconvénient la décharge de bouteilles de Leyde, présentant il est vrai, des capacités très faibles mais aussi chargées à des potentiels bien supérieurs et dans lesquelles la quantité d'énergie, croissant comme le carré de E, ($\frac{1}{2}$ c E^2) peut être beaucoup plus considérable. Admettons que cette quantité ne soit qu'égale, même dans ce cas, la décharge des bouteilles de Leyde présente au point de vue du choc, un caractère de gravité incontestablement plus grand, puisque par suite du potentiel plus élevé, l'intensité initiale et surtout la puissance initiale sont beaucoup plus grandes que dans le

Digitized by Google

cas de la décharge d'un distributeur. On peut alors représenter les décharges par les deux courbes de surfaces égales 1 et 2 (fig. 285), ce qui revient à dire que dans le cas de la bouteille de Leyde, la même quantité d'énergie traverse le corps en un temps infiniment plus court et doit engendrer nécessairement un choc beaucoup plus violent. »

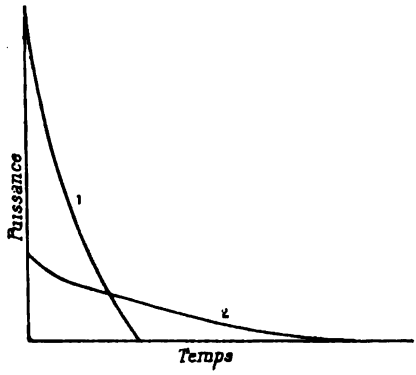


Fig. 285.

« La décharge des bouteilles de Leyde n'entraînant pas de conséquences graves, nous sommes donc amené *a fortiori* à conclure que le courant de décharge de la distribution sera inoffensif. »

« Il ne peut y avoir de doute sur l'efficacité de ce système et sur l'intérêt qu'il y aurait à l'employer ».

« S'il est possible d'ailleurs de le combiner avec un de ceux que j'ai indiqués précédemment, c'est-à-dire de combattre par de la s. i., une capacité rendue aussi faible que possible, par les moyens que j'ai signalés, on pourra arriver à des isolements en marche de l'ordre des centaines de mille ohms, ce qui sera largement suffisant ».

Précautions à prendre pour la protection des circuits secondaires.

Il faut éviter avec le plus grand soin que les circuits secondaires, reliés aux transformateurs, ne viennent à être mis en communication avec le circuit à haute tension, car les personnes qui viendraient à toucher les fils pourraient être exposées aux plus grands dangers.

Une disposition excellente proposée par MM. *Thomson et Kent* est de séparer complètement les deux circuits des transformateurs par une feuille de métal (convenablement feuilletée, afin d'éviter les courants de Foucault), mise à la terre.

Toute fuite dans le circuit primaire, va alors à la terre, avant d'atteindre le circuit secondaire. Malheureusement cette disposition complique la fabrication des transformateurs et peut rarement être employée.

M. *Mordey* a proposé de mettre le milieu du secondaire à la terre.

Digitized by Google

Cette disposition, qui supprime tout danger pour les personnes, a l'inconvénient d'exercer un effort permanent sur l'isolement du circuit. Les chances d'incendie, pouvant provenir du contact à la terre d'un autre point du circuit, sont augmentées. Le board of trade anglais et la plupart des compagnies d'assurances interdisent cette disposition.

Avec ce système, on peut employer des *cherche-pertes automatiques*. On place sur le fil de terre un électro-aimant qui, lorsque ses spires sont parcourues par un courant, suffisamment intense, attire son armature.

Celle-ci actionne un commutateur double coupant les circuits primaires des transformateurs. A la station centrale, on installe un cherche-perte analogue.

Si il y a contact entre le primaire et le secondaire, un courant circule dans les cherche-pertes, le circuit secondaire est isolé et le personnel de l'usine prévenu.

Ce dispositif supprime les chances d'incendie, mais il y a toujours un effort permanent exercé sur l'isolement des diverses parties des circuits.

Il vaut mieux adopter des dispositifs dans lesquels le circuit secondaire est mis à la terre, seulement quand la tension y devient trop grande ; on emploie pour celà les appareils suivants :

L'appareil Cardew, qui est constitué par deux plaques de laiton isolées, placées à une distance l'une de l'autre dépendant de la tension que l'on ne veut pas dépasser. Ces plaques sont placées entre deux ressorts fixés à une plaque d'ébonite, formant contacts. Le ressort supérieur et par conséquent la plaque supérieure communique avec le circuit, le ressort et la plaque inférieure avec la terre.

Entre les deux plaques est placée une mince feuille d'aluminium, fixée par une de ses extrémités à la plaque inférieure et qui en temps ordinaire repose sur cette dernière.

Quand la tension atteint une certaine valeur, l'attraction statique fait soulever la feuille d'aluminium qui vient toucher la plaque supérieure et par conséquent met le circuit à la terre, de sorte que le courant qui passe est suffisant pour fondre les plombs.

On peut également disposer l'appareil Cardew de la manière suivante :

Digitized by Google

La plaque d'aluminium est placée à environ 3 millimètres au-dessous d'un disque métallique monté sur une tige qui communique avec le circuit secondaire par l'intermédiaire d'un fil fusible très fin.

Ce fil maintient la clef d'un interrupteur à ressort dont les plots sont reliés aux pôles du circuit primaire du transformateur.

Lorsque la différence de potentiel entre le circuit secondaire et la terre atteint la limite fixée (400 à 500 volts ordinairement), la feuille d'aluminium est attirée par le disque métallique; il y a alors passage d'un courant qui fait fondre le fil, de sorte que la clef de l'interrupteur, qui est abandonnée à l'action du ressort, coupe le circuit primaire.

L'appareil de MM. *Drake* et *Gorham* est basé sur le même principe que l'appareil Cardew.

Dans un cylindre de verre, fermé à ses deux extrémités par des couvercles d'ébonite, pénètre une forte tige verticale reliée à un disque de laiton par un axe horizontal; cette tige est en communication avec le circuit. Une seconde tige, reliée à la terre, porte un deuxième disque de laiton placé en face du premier, auquel est attachée à la partie supérieure une feuille d'aluminium. Cette feuille est attirée par le disque et met par conséquent le circuit à la terre, quand la tension dépasse la limite fixée à l'avance.

La *Compagnie Thomson-Houston* emploie un appareil comportant trois plots. Les deux plots extrêmes sont intercalés dans le circuit et reliés par un ressort qui est fortement pressé contre le troisième plot communiquant avec la terre,

Entre le ressort et ce plot est intercalé un morceau de papier spécial qui assure l'isolement.

Lorsque la tension efficace dépasse une valeur donnée, le papier est brûlé et le circuit mis à la terre.

Les *coupe-circuits à poids de M. Ferranti* (1) fonctionnent de la manière suivante :

Un fil fusible très mince G (fig. 286) est placé en dérivation sur le secondaire, il porte un poids F. Quand le potentiel augmente, le fil fond et le poids F tombe, ce dernier relie alors entre eux deux blocs DD, de sorte que le secondaire est mis en court-circuit et les plombs

1. E. Richard, *Détails de Construction des Machines dynamos* (*la Lumière électrique* du 30 avril 1892).

Digitized by Google

du primaire fondent. Le contrepoids en tombant peut aussi au besoin faire manœuvrer un commutateur isolant le transformateur.

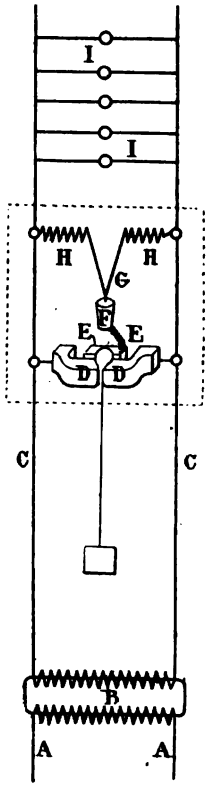


Fig. 286

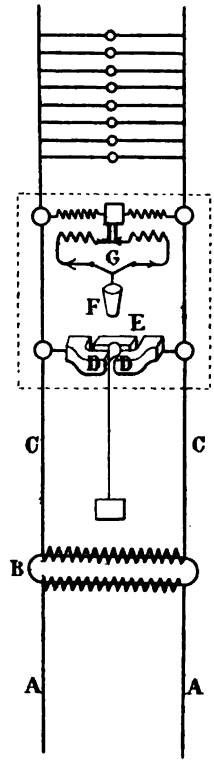


Fig. 287

Dans un autre dispositif (fig. 287), le fil fusible est intercalé dans le secondaire G d'un petit transformateur H, dont le primaire est en dérivation sur le circuit secondaire.

§ 12. — SOINS A DONNER AUX SUJETS VICTIMES D'ACCIDENTS PAR L'ÉLECTRICITÉ.

Sur la demande du ministre des travaux publics l'Académie de médecine a nommé une commission composée de MM. Bouchard, d'Ar-

Digitized by Google

sonval, Laborde et Gariel, chargée d'élaborer une instruction relative aux soins à donner aux sujets victimes d'accidents par l'électricité.

Voici, d'après l'*Électricien* du 12 janvier 1895, le texte de l'instruction que la commission a soumise à l'approbation de la Compagnie.

Lorsqu'un individu est victime d'un accident dû au contact de conducteurs d'électricité ou de machines génératrices, le contact peut exister encore lorsque les secours arrivent ou le contact peut avoir cessé.

Dans le premier cas, des précautions particulières doivent être prises pour faire cesser le contact, sans que les personnes qui interviennent puissent être également victimes.

S'il est possible, il convient de faire cesser immédiatement le fonctionnement de la machine génératrice; si ce n'est pas possible, on interrompra le courant en coupant le conducteur avec des instruments dans lesquels la partie tranchante sera séparée du manche par des parties isolantes, ou bien encore on établira la mise à la terre ou une dérivation à l'aide d'un conducteur de faible résistance qui diminuera l'intensité du courant dans la partie où la victime est en contact avec le conducteur principal.

Ces remarques sont signalées à titre d'indication seulement, elles devront être précisées par la commission technique spéciale, instituée par M. le ministre des travaux publics.

En ce qui touche les instructions relatives aux premiers soins à donner aux foudroyés, victimes des accidents électriques, la commission propose les mesures suivantes :

On transportera d'abord la victime dans un local aéré, où l'on ne conservera qu'un petit nombre d'aides, trois ou quatre, toutes les autres personnes étant écartées.

On desserrera les vêtements et on s'efforcera le plus rapidement possible, de rétablir la respiration et la circulation.

Pour rétablir la respiration, on peut avoir recours principalement aux deux moyens suivants, la traction de la langue et la respiration artificielle.

1° *Méthode de la traction rythmée de la langue* :

Ouvrir la bouche de la victime et si les dents sont serrées, les écarter en forçant avec les doigts ou avec un corps résistant quel-

Digitized by Google

conque, morceau de bois, manche de couteau, dos de cuiller ou de fourchette, extrémité d'une canne.

Saisir solidement la partie antérieure de la langue entre le pouce et l'index de la main droite, nus ou revêtus d'un linge quelconque, d'un mouchoir de poche par exemple (pour empêcher le glissement) et exercer sur elle de fortes tractions répétées, successives, cadencées ou rythmées, suivies de relâchements, en imitant les mouvements rythmés de la respiration elle-même, au nombre d'au moins vingt par minute.

Les tractions linguales doivent être pratiquées sans retard et avec persistance, durant une demi-heure, une heure et plus.

2° *Méthode de la respiration artificielle* :

Coucher la victime sur le dos, les épaules légèrement soulevées. la bouche ouverte, la langue bien dégagée. Saisir les bras à la hauteur des coudes, les appuyer assez fortement sur les parois de la poitrine, puis les écarter et les porter au-dessus de la tête, en décrivant un arc de cercle; les ramener ensuite à leur position primitive, sur les parois de la poitrine.

Répéter ces mouvements environ vingt fois par minute, en continuant jusqu'au rétablissement de la respiration naturelle.

Il conviendra de commencer toujours par la méthode de la traction de la langue, en appliquant, s'il est possible, la méthode de la respiration artificielle.

D'autre part, il conviendra concurremment de chercher à ramener la circulation en frictionnant la surface du corps, en flagellant le tronc avec les mains ou avec des serviettes mouillées, en jetant de temps en temps de l'eau froide sur la figure, en faisant respirer de l'ammoniaque et du vinaigre.

Digitized by Google

CHAPITRE VII

Distribution du courant.

§ 1er. — DU CHOIX DE LA FRÉQUENCE.

Quand le courant doit servir à l'éclairage, la fréquence doit être au moins de 30 pour l'incandescence (page 261)) et de 40 pour les arcs (page 264).

Nous allons rappeler brièvement l'influence de la fréquence sur les pertes dans le fer, les prix de revient des appareils, les pertes en ligne.

Pertes dans le fer. — Avec la tôle ordinairement employée, ayant une épaisseur de 0,5 m. m., la perte par hystérésis et courants de Foucault par c. m.^{2} est exprimée en watts par la relation :

$$W = F\,B\,10^{-7}\left\{0{,}003\,B^{1{,}6} + 0{,}0004\,F\,B\,10^{-3}\right\}$$

On peut, au moyen de cette relation, déterminer la valeur à donner à l'induction maximum B pour que la perte par c. m.^{2} soit constante.

Les valeurs de B, données à la page 96, sont relatives à une perte de 0,015 à 0,018 watt par c. m.^{2}; on voit que B n'est pas tout à fait inversement proportionnel à F. Pour une perte de 0,015 watt, on a pour F = 60, B = 4450, et pour F = 120, B = 2700.

Alternateurs. — Des considérations énoncées page 11 et suivantes, il résulte que la fréquence n'a pas d'influence marquée sur les décalages, dus à s. i. propre d'un alternateur, sur l'intensité efficace en court-circuit, etc.

Le prix de l'alternateur diminue en même temps que la fréquence.

Digitized by Google

Transformateurs. — La section du fer d'un transformateur est donnée par la relation (page 251) :

$$\Phi_0 = B\,S = \frac{\sqrt{2}\,E_1^e\,10^8}{2\,\pi\,F\,n_1}$$

Toutes choses égales d'ailleurs, Φ_0 diminue quand F augmente La perte en watts par c. m. de longueur du fer est :

$$w = \frac{\sqrt{2}\,E_1^e\,10}{2\,\pi\,n_1}\left\{0{,}003\,B^{0,6} + 0{,}0004\,F\,B\,10^{-3}\right\}$$

La perte augmente avec B et F, de sorte qu'il y a dans chaque cas particulier une fréquence pour laquelle la somme des frais d'amortissement et des dépenses provenant de la perte d'énergie est minimum.

Cependant, en général, plus la fréquence est élevée, plus le prix de revient est minime. Mais une autre considération doit intervenir, c'est celle de la surface de refroidissement du transformateur, qui est proportionnellement beaucoup plus grande dans les petits appareils que dans les grands.

En Amérique où chaque feeder est desservi par un alternateur spécial et où de petits transformateurs sont installés chez les abonnés, on peut adopter une fréquence beaucoup plus élevée qu'en Europe, où l'on a tendance à avoir des sous-stations avec transformateurs de grande puissance.

Moteurs. — Le nombre de pôles dépend du nombre de tours et de la fréquence; plus la fréquence est faible, moins on est obligé d'avoir de pôles et de bobines inductrices. La diminution de section du fer, qui est analogue à celle pour les transformateurs, ne compense pas la dépense due à l'augmentation du nombre des pôles.

En outre, comme le nombre de bobines inductrices (pour le même nombre de tours par minute) augmente avec la fréquence, il en est de même de l'intensité efficace du courant de magnétisation (voir page 187).

Les données de la table de la page 95 permettent de se rendre compte de l'influence de la fréquence sur le nombre de pôles (il faut

Digitized by Google

y faire C = 2 p.). Pour la fréquence de 40 à 50, un moteur à quatre pôles a au maximum, une vitesse de 1.500 tours à la minute, ce qui n'est pas exagéré pour un moteur de puissance moyenne; à la fréquence de 130, un moteur à dix pôles fait 1.560 tours à la minute.

D'après la table de M. Hospitalier (page 309), pour la fréquence de 50, employée en Europe, la *résistance effective* d'un conducteur circulaire de 2 c. m. de diamètre ne diffère pratiquement pas de la résistance ohmique, tandis qu'avec la fréquence de 130, adoptée en Amérique, pour le même conducteur, l'augmentation de résistance est de 20 %.

On voit bien qu'avec la fréquence de 130, on ne peut avoir, à moins de pertes exagérées, un réseau secondaire ayant un certain développement, si on n'emploie pas des conducteurs plats ou creux, ce qui est toujours très coûteux et entraine à de grandes complications.

Pour deux fils aériens de 5 mm. de diamètre, placés à 50 c.m. l'un de l'autre, le *facteur d'impédance* pour la fréquence de 50 est 1,08 et pour la fréquence de 1,30 de 1,46 (page 324).

Si on considère en outre que la perte d'énergie dans les câbles armés augmente avec la fréquence, on peut conclure des diverses observations qui précèdent, que, pour le cas où la distribution (comportant l'éclairage simultané) se fait par sous-stations, la fréquence la plus avantageuse est comprise entre 40 et 60.

Pour le cas d'une distribution avec transformateurs chez les abonnés, la fréquence peut être plus élevée surtout, si la distribution est souterraine, car dans ce cas, la capacité des câbles, peut annuler jusqu'à un certain point les effets de la s. i.

Pour le cas de transport de puissance (sans éclairage avec le même courant), surtout quand le transport se fait par lignes aériennes, il vaut mieux adopter une fréquence très faible; c'est ainsi que pour l'utilisation des chutes du Niagara, M. Forbes à adopté une fréquence de 16,67 (page 73).

§ 2. — CLASSIFICATION DES SYSTÈMES DE DISTRIBUTION.

On peut classer les distributions du courant alternatif en cinq grandes divisions :

Digitized by Google

1° Les distributions directes ;
2° Les distributions avec transformateurs ;
3° Les distributions avec condensateurs ;
4° Les distributions par courants polyphasés ;
5° Les distributions mixtes.

§ 3. — DISTRIBUTIONS DIRECTES.

Jusqu'ici on n'a pas beaucoup installé de distributions directes du courant alternatif, car dans le cas où les foyers ne sont pas très éloignés des générateurs, on emploie généralement le courant continu.

Cependant dans certains cas, on peut avoir avantage à employer un tel système de distribution ; par exemple, afin de réaliser des économies de cuivre, dans une distribution par arcs, on peut installer plusieurs foyers en tension.

Dans le cas du courant continu, quand un des arcs en tension doit être allumé, l'énergie à fournir est la même, que les autres arcs soient allumés ou non, car on doit absorber l'excès de tension au moyen d'une résistance. Il n'en est pas de même lorsque l'on emploie le courant alternatif. On peut alors au moyen de bobines à réaction, faire varier le potentiel, sans pour ainsi dire dépenser d'énergie.

On peut rattacher au système direct de distribution les méthodes employées par la Compagnie Westinghouse à (East Liberty, États-Unis) et par la Compagnie Thomson-Houston, pour l'éclairage des rues au moyen de lampes à incandescence en série.

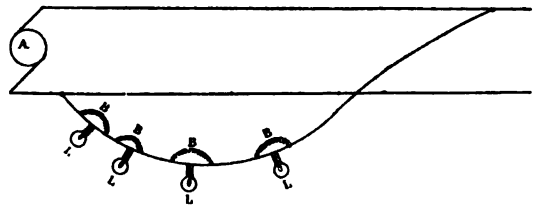


Fig. 288

Dans le système Westinghouse (fig. 288), les lampes à incandescense sont placées en série dans un circuit primaire, qui peut en

Digitized by Google

outre alimenter des transformateurs. Aux bornes de chacune des lampes L, est placée en dérivation une bobine à réaction B, de faible résistance ohmique.

Si le filament de la lampe se brise, cette bobine est mise en tension dans le circuit et sa s. i. produit une résistance apparente égale à la résistance de la lampe elle-même, de sorte que les autres lampes du circuit continuent à fonctionner dans de bonnes conditions.

Dans le système Thomson-Houston, les lampes sont également placées en série dans un circuit dérivé du circuit primaire (à 1.000 v.), qui alimente en outre des transformateurs.

Chaque lampe est munie d'un dispositif, qui intercale dans le circuit une résistance équivalente, quand le filament vient à se briser. Ce dispositif est constitué de la manière suivante, un ressort relié à l'une des bornes de la lampe, par l'intermédiaire de la résistance à intercaler, vient appuyer sur un plot relié à l'autre borne, il est isolé de ce plot par un morceau de papier spécial. Ce morceau de papier peut résister à la différence de potentiel efficace (20 à 25 volts, différence de potentiel maximum $\sqrt{2}.20$ à $\sqrt{2}.25$) régnant entre les deux bornes quand la lampe fonctionne. Si le filament vient à être brûlé, le papier est soumis à la différence de potentiel efficace totale de 1.000 volts et est percé. Les deux bornes de la lampe sont alors reliées par l'intermédiaire de la résistance et les autres lampes continuent à fonctionner dans de bonnes conditions.

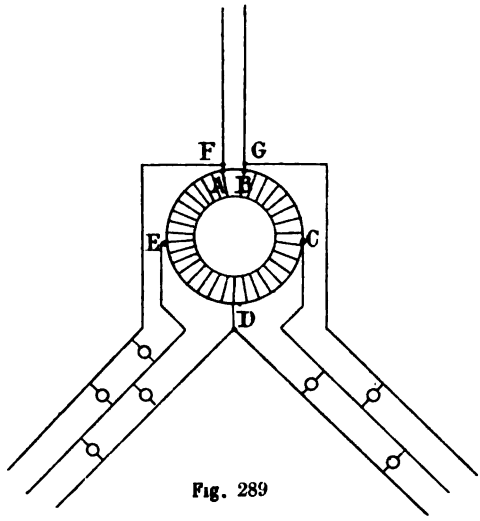


Fig. 289

M. le professeur Elihu Thomson avait imaginé, avant que l'emploi des transformateurs ne fut devenu industriel, un système de distribution à trois fils qui peut être considéré comme une combinaison de distribution directe et de distribution par transformateurs

Le compensateur (fig. 289) est formé d'un anneau de fer sur lequel

Digitized by Google

est enroulé un fil unique dont les deux extrémités A et B sont placées en dérivation sur le circuit direct relié à l'alternateur. Le milieu D du fil enroulé sur l'anneau est relié aux fils extérieurs des deux circuits à trois fils, dont les autres fils extérieurs sont dérivés en F et en G du circuit direct. Les fils neutres des deux circuits à trois fils sont reliés au fil enroulé sur la bobine, en des points C et F, placés respectivement au milieu de AD et de BD.

Le compensateur agit comme un transformateur dont le rapport de transformation serait variable et les lampes placées en dérivation entre les fils neutres et les fils extrêmes fonctionnent à potentiel constant quelles que soient les charges des quatre circuits.

§ 4. — DISTRIBUTIONS AVEC TRANSFORMATEURS

Les distributions avec transformateurs peuvent être classées comme il suit :

1° Les transformateurs sont placés en série dans le circuit primaire et les récepteurs en série dans le circuit secondaire ;

2° Les transformateurs sont placés en série dans le circuit primaire et les récepteurs en dérivation sur le circuit secondaire ;

3° Les transformateurs sont placés en dérivation sur le circuit primaire et les récepteurs en série dans le circuit secondaire ;

4° Les transformateurs sont placés en dérivation sur le circuit primaire et les récepteurs en dérivation sur le circuit secondaire.

En se rappelant les propriétés caractéristiques des transformateurs qui sont : 1° si l'on maintient l'intensité efficace du courant circulant dans le circuit primaire constante, l'intensité efficace du courant secondaire est sensiblement constante ; 2° si la f. e. m. efficace agissant aux bornes du primaire est constante, la f. e. m. efficace dans le secondaire est sensiblement constante ; on voit que les deux systèmes de distribution réellement pratiques sont le premier et le dernier.

Nous allons examiner les divers cas qui peuvent se présenter en employant ces deux systèmes.

Digitized by Google

1° *Transformateurs en série dans le circuit secondaire.*

La distribution a lieu à intensité constante.

Ce genre de distribution avait été adopté par MM. Gaulard et Gibbs dans leurs célèbres expériences de l'Exposition de Turin, en 1884, qui déterminèrent l'emploi industriel du courant alternatif. (1).

Dans ces expériences, le circuit primaire, constitué par une ligne aérienne en bronze chromé de 3,7 m. m. de diamètre, avait un développement de 80 kilomètres et une résistance de 130 ohms. Le générateur était un alternateur Siemens (134 alternances à la seconde), mû par une machine à vapeur de 30 chevaux. Cinq générateurs secondaires (transformateurs) étaient montés en série dans le circuit primaire et alimentaient 60 lampes à incandescence ainsi qu'une lampe à arc.

La Compagnie américaine Westinghouse applique ce système pour l'éclairage à arc, car l'intensité efficace étant constante (tant dans le primaire que dans le secondaire), la disposition convient très bien pour les arcs, dont la lumière a ainsi une grande fixité.

Ces installations sont particulièrement destinées à l'éclairage des rues, mais cependant elles desservent des installations particulières et même certains abonnés, voulant éviter les frais d'achat d'un transformateur, font installer directement, malgré le danger qui en résulte, leurs lampes sur le circuit primaire.

La figure 290 donne d'après M. Fleming, le schéma d'un tel circuit.

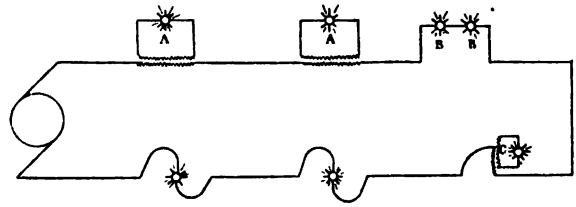


Fig. 290

AA sont des lampes installées chez des particuliers, desservies par des transformateurs, BB sont des lampes de particuliers, installées directement dans le circuit primaire, C une lampe éclairant une rue, desservie par un transformateur.

1. Les brevets Gaulard et Gibbs sont postérieurs à ceux de M. Jablochkoff et de sir Charles Bright, mais leurs transformateurs ont été employés industriellement les premiers, à l'Exposition de Londres, en 1883 et à la fin de la même année, pour l'éclairage des stations du métropolitain de Londres.

Digitized by Google

Dans le cas où le nombre de lampes desservies n'excède pas 60, l'intensité efficace du courant primaire est fixée à 10 ampères et les primaires et les secondaires des transformateurs ont le même nombre de spires.

Dans le cas où le circuit doit desservir plus de 60 lampes, l'intensité efficace dans le primaire est de 60 ampères, toutes les lampes sont alors placées sur les circuits secondaires de transformateurs, car l'intensité du primaire est trop élevée pour les lampes ordinairement employées.

Chaque circuit est desservi par un alternateur spécial et il n'y a pas de disposition prise pour la régulation du courant, les machines Westinghouse pour l'éclairage à l'arc étant autorégulatrices, le flux magnétique et par conséquent la f. e. m. étant pratiquement proportionnel à la résistance apparente du circuit secondaire (page 53).

2° *Transformateurs en dérivation sur le circuit primaire.*

On peut, soit placer de petits transformateurs dans chaque immeuble, (fig. 291), mais alors à moins d'employer des dispositions

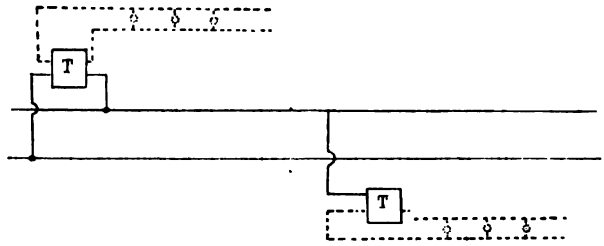


Fig. 291

spéciales indiquées par M. Swinburn, que nous étudierons plus loin, tous les transformateurs sont constamment en circuit et le rendement moyen de la distribution est très faible.

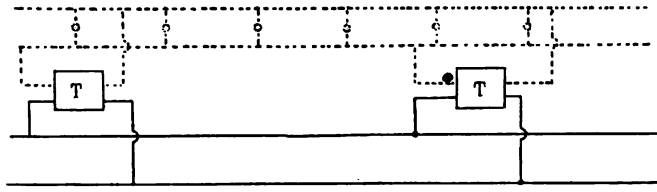


Fig. 292

Il vaut mieux, au point de vue du rendement, installer des centres de distributions secondaires (fig. 292), desservant un certain rayon.

Digitized by Google

Chacun de ces centres comporte un certain nombre de transformateurs de grandes dimensions (qui ont un rendement plus élevé et reviennent moins cher à puissance égale que des petits transformateurs), qui sont intercalés dans le circuit au fur et à mesure que la demande du courant s'accroît, soit automatiquement, soit par l'intermédiaire d'un employé spécial. Ce système a en outre deux autres avantages importants sur le premier.

Le nombre de raccordements sur la canalisation primaire est beaucoup moins élevé, or une jonction quelle que bien faite qu'elle soit est toujours un point faible pour l'isolation.

Quand on installe un transformateur dans un immeuble, il faut lui donner une puissance suffisante pour qu'il puisse alimenter simultanément toutes les lampes de cet immeuble, car il peut arriver que l'on allume toutes les lampes en même temps.

Quand un centre secondaire dessert un grand nombre d'immeubles, jamais toutes les lampes installées ne sont allumées simultanément, on a constaté partout que jamais plus de 70 % des lampes ne brûlent simultanément, il y a donc là une économie sérieuse à faire sur la puissance totale des transformateurs à employer.

MM. Ferranti, Kapp, Gordon et Tomlinson ont imaginé des dispositifs permettant de faire varier automatiquement à distance, le nombre de transformateurs en service dans une sous-station, suivant la charge d'un circuit secondaire (1).

Dans la première disposition de M. Ferranti, un courant passe constamment dans deux électros auxiliaires, portant chacun un aimant fixe et suivant l'intensité efficace du courant, un levier mobile portant des aimants, bascule d'un côté ou d'un autre, faisant fermer ou ouvrir les circuits primaires et secondaires des transformateurs.

M. Ferranti emploie aussi des commutateurs actionnés par un petit moteur, disposition employée également par M. Kapp.

M. Thomlinson relie la sous-section à la station centrale, par un circuit à fil fin. La station centrale est avertie par un coup de cloche, chaque fois qu'elle doit intercaler un nouveau transformateur, ou

1. Voir à ce sujet un article de M. Richard, paru dans la *Lumière électrique* du 23 avril 1892, donnant des détails sur ces divers appareils.

Digitized by Google

en enlever un du circuit. On se sert du circuit à fil fin pour actionner un relais et exécuter ces manœuvres.

La Compagnie Westinghouse, à sa station centrale de Sardinia Street à Londres, qui emploie le système avec transformateurs chez les abonnés, dispose les circuits primaires, en forme de doubles anneaux autour des pâtés de maisons, ainsi que l'indique la figure 293,

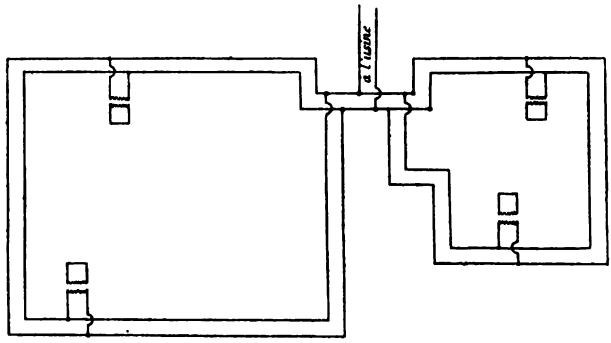


Fig. 293

on peut ainsi enlever une portion du câble pour le réparer, sans avoir d'extinction.

Quand plusieurs feeders ou circuits primaires partent d'une usine et que le potentiel de la distribution est très élevé, il est bon de ne pas les placer en dérivation sur un même alternateur ou un même groupe d'alternateurs placés en quantité, en effet, il suffirait que deux des circuits aient chacun un contact à la terre pour amener un court-circuit général très dangereux. Il vaut mieux alors alimenter chaque circuit par un alternateur spécial (ou par un transformateur spécial, si on relève la tension du courant avant de l'envoyer sur la ligne) ou par un groupe spécial d'alternateurs, si le courant à fournir est important.

Dans ce cas, l'inconvénient est que, si l'alternateur desservant un circuit, est mis hors de service, le circuit n'est plus alimenté.

M. Swinburn (1), pour remédier à cet inconvénient, a proposé d'avoir recours à une sorte de transformateur auxiliaire *d* (fig. 294), portant autant de bobines qu'il y a d'alternateurs, chaque alternateur communiquant avec une de ces bobines.

Les alternateurs sont ainsi couplés en quantité, sans qu'il y ait

1. Eric Gérard. *Leçons sur l'électricité*. Tome II, page 59.

Digitized by Google

liaison directe entre les divers circuits primaires. Les courants traversant les bobines du transformateur ont seulement l'intensité nécessaire pour maintenir les machines en concordance. Si l'une de celles-ci, *a* par exemple, vient à être mise hors de service, on l'isole, et la bobine correspondante fournit l'énergie électrique aux feeders 1 et 2, jusqu'à ce que l'on ait pu relier ceux-ci à un des autres alternateurs ou à une machine de réserve.

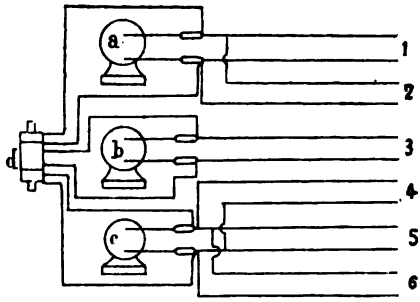


Fig. 294

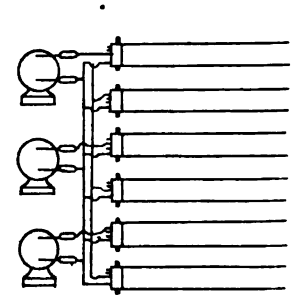


Fig. 295

Dans le cas où l'on veut relever la tension, avant d'envoyer le courant sur la ligne, on emploie un transformateur spécial pour chaque circuit primaire. Ainsi que l'a indiqué M. Swinburn, les alternateurs peuvent alors être groupés en quantité sur les circuits primaires (fig. 295).

3° *Régulation du potentiel.*

Trois causes peuvent faire varier le potentiel aux bornes des récepteurs.

1° La variation de la perte de charge dans le circuit primaire.

2° La variation de la perte de charge dans le circuit secondaire.

3° La variation de potentiel aux bornes du secondaire, provenant de la variation de charge du ou des transformateurs.

Les deux dernières variations peuvent généralement être réduites à une valeur compatible avec le bon fonctionnement des récepteurs, en choisissant comme nous l'avons vu, de bons transformateurs et en donnant une section suffisante aux conducteurs secondaires.

On doit donc réduire les différences de voltage aux bornes des primaires, à une valeur admissible.

A cet effet, on maintient, soit automatiquement, soit par l'intermé-

Digitized by Google

diaire d'un agent, *le potentiel constant entre deux points donnés du circuit primaire.*

Ces points étant choisis, les sections des conducteurs primaires à partir de ces points, sont calculées de manière que la variation de tension aux bornes des différents transformateurs, dues à la perte de charge, ne dépassent pas la valeur admissible.

On peut même disposer le circuit de manière que le potentiel, en tous les points, soit le même, en employant le système de montage en boucle (fig. 296), à partir du centre à potentiel constant.

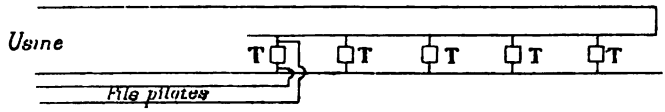


Fig. 296

Il faut donc pouvoir mesurer la différence de potentiel entre deux points donnés du circuit primaire.

On peut pour celà :

Employer des *fils pilotes ou de potentiel*, c'est-à-dire deux fils fins reliant les points donnés au tableau. Comme ces fils sont soumis au potentiel régnant dans le circuit primaire, ils sont difficiles à isoler. A leur arrivée au tableau, ils aboutissent ordinairement à un transformateur réducteur, dans le circuit secondaire duquel est intercalé le voltmètre indicateur.

Pour avoir moins de difficulté à isoler ces fils, on peut placer le transformateur réducteur entre les points donnés, de sorte que les fils, branchés sur le circuit secondaire, sont soumis à une faible tension. Ils aboutissent alors directement au voltmètre installé sur le tableau.

Comme les fils pilotes sont très coûteux, on a cherché à en supprimer l'emploi, en se basant sur le principe suivant :

Si V est la différence de potentiel efficace au tableau de l'usine, R la résistance de la portion du circuit primaire entre le tableau et le centre à potentiel constant et I, l'intensité efficace du courant primaire, la différence de potentiel efficace au centre à potentiel constant sera :

$$V' = V - R\,I$$

Dans le circuit contenant le voltmètre sont placés les circuits secon-

Digitized by Google

daires de deux transformateurs, le primaire du premier, T_1 (fig. 297), étant placé en dérivation sur le circuit à haute tension, la f. e. m. efficace du secondaire est donc proportionnelle à V.

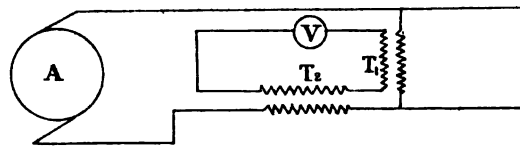


Fig. 297

Le primaire de l'autre transformateur T_2, que l'on nomme *le compensateur* est placé en série dans le circuit à haute tension, la f. e. m. du secondaire est proportionnelle à RI.

On voit qu'en enroulant en sens inverse les deux secondaires, et en proportionnant convenablement les nombres de spires de ces circuits, le voltmètre pourra indiquer la tension efficace V — RI, entre deux points de la ligne choisis à l'avance.

Dans le cas où le centre à potentiel constant est le tableau de l'usine, il faut que le voltmètre indique la différence de potentiel aux bornes de l'alternateur. On peut choisir une bobine de l'alternateur, la relier par l'intermédiaire d'un commutateur au tableau et en mesurer soit directement le voltage, qui est une fraction du voltage total, soit se servir d'un petit transformateur et intercaler le voltmètre dans le secondaire de ce dernier.

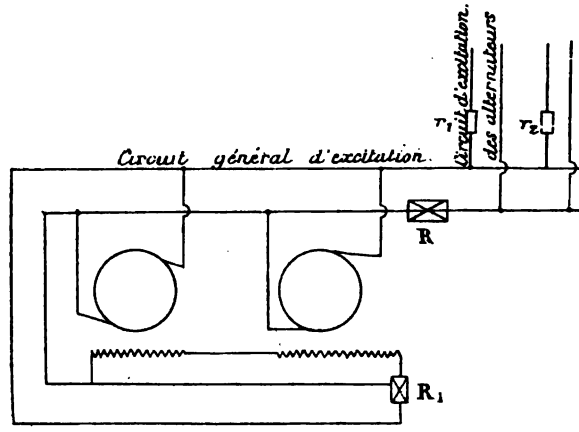


Fig. 298

Il faut, pour maintenir le potentiel constant au centre choisi, pou-

Digitized by Google

voir faire varier le potentiel aux bornes des alternateurs et pour cela agir sur le courant d'excitation.

Dans les stations un peu importantes, les alternateurs sont ordinairement excités au moyen de une ou plusieurs dynamos à courant continu.

Ces dynamos sont placées en quantité sur le circuit général d'excitation, leurs inducteurs étant montés en série sur une dérivation de ce circuit.

L'excitation de chacun des alternateurs est dérivée du circuit général (fig. 298).

Régulation du potentiel à la main.

Si le circuit dont on veut maintenir entre deux points le potentiel constant, est desservi exclusivement par un ou plusieurs alternateurs, on peut obtenir la régulation, en agissant sur l'excitation de trois manières différentes.

a) En faisant varier les résistances r_1 r_2, etc... intercalées dans les dérivations du circuit général d'excitation, desservant les alternateurs.

b) En faisant varier la résistance R intercalée dans le circuit général d'excitation. Ce système n'est pas économique, car la résistance absorbe de l'énergie en pure perte.

c) En faisant varier l'excitation des génératrices à courant continu au moyen du rhéostat R_1, c'est le procédé le plus commode et il a l'avantage de ne pas causer de perte d'énergie.

Quand un alternateur dessert plusieurs circuits (excepté naturellement le cas où le centre à potentiel constant est l'usine), il faut régler le potentiel dans chaque circuit, sans toucher à l'excitation, qui reste à peu près constante, on peut alors employer un des trois moyens suivants :

a) Intercaler dans chacun des circuits un rhéostat dont on fait varier la résistance inversement à la charge (de manière qu'à pleine charge, la résistance intercalée soit nulle).

Cette disposition a l'inconvénient d'absorber de l'énergie en pure perte, tant que la charge du circuit n'est pas maximum.

b) Intercaler dans chacun des circuits une bobine à réaction, dont on peut faire varier la s. i. On fait ainsi varier la résistance apparente du circuit. Il y a encore là un peu d'énergie perdue, par suite de

Digitized by Google

l'échauffement de la bobine de cuivre, mais beaucoup moins que dans le cas précédent.

c) On peut aussi disposer, à l'origine de chaque circuit, un appareil dû à M. Kapp (fig. 299), dont le fonctionnement repose sur le même principe que le compensateur pour voltmètre.

A l'origine du circuit est installé un transformateur dont le primaire A est en dérivation sur le circuit général et dont le secondaire B est en série sur le circuit dont on veut maintenir le potentiel constant à un centre donné. Le nombre de spires du primaire du transformateur est variable à la main, on en intercale d'autant plus que la charge est plus grande, de manière à compenser la perte RI.

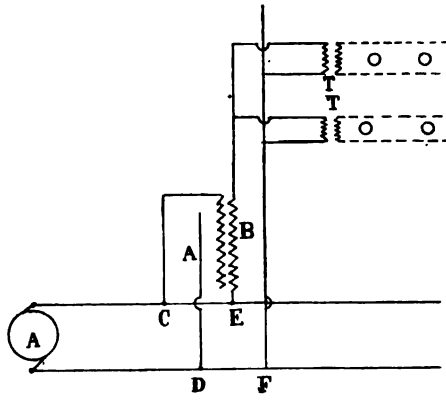


Fig. 299

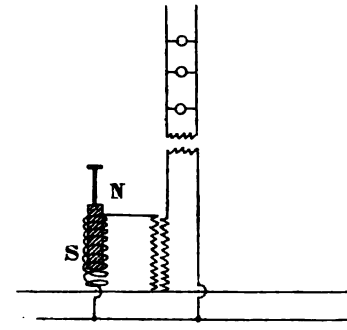


Fig. 300

La compagnie Westinghouse emploie un système analogue, mais au lieu de faire varier le nombre de spires du primaire du transformateur placé en dérivation sur le circuit principal, on fait varier soit à la main, soit automatiquement, la résistance apparente de ce circuit, en faisant varier sa s. i.

Pour cela, un noyau de fer N pénètre plus ou moins dans un solénoïde S (fig. 300).

Régulation automatique du potentiel.

Système Lawrie Hall (1). Dans ce système on maintient le potentiel constant à l'usine.

Dans le circuit de la dynamo excitatrice E sont montées en série les bobines de son inducteur e_1 (fig. 301) et celles de l'inducteur de

1. Fleming. *The alternate current transformer.* Volume 2.

Digitized by Google

l'alternateur e_2 ; en dérivation sur e_1 est monté un circuit $a\ t\ b$ de résistance variable. La variation de la résistance de ce circuit est obtenue en faisant plonger plus ou moins deux plaques de métal t de forme triangulaire, isolées entre elles, dans un bassin électrolytique S. Plus les plaques sont immergées plus la résistance est faible et par conséquent moins il passe de courant dans l'inducteur e_1 de l'excitatrice, de sorte que le courant de cette dernière diminue, ce qui fait baisser le voltage aux bornes de l'alternateur. Quant au contraire les plaques se soulèvent de plus en plus, la résistance du shunt augmente, l'intensité du courant d'excitation augmente et le voltage aux bornes de l'alternateur se relève.

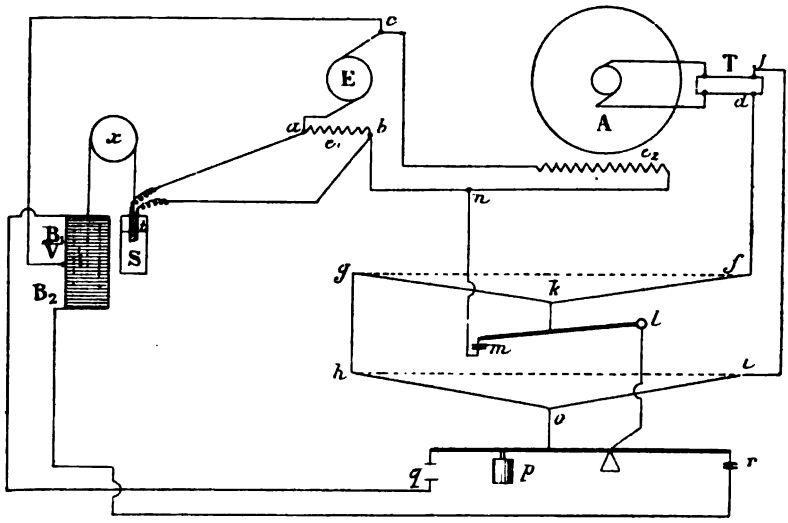


Fig. 301

Dans le circuit de deux bobines de l'alternateur est intercalé le primaire d'un transformateur T, dont le circuit secondaire est d, f, g, h, o, i, j.

Ce circuit comprend deux fils $f\ g$ et $h\ i$ qui, lorsqu'ils ne sont parcourus par aucun courant, c'est-à-dire froids, sont tendus comme il est indiqué par les lignes pointillées. Au milieu du fil $f\ g$, est suspendu en k, un cordon soutenant un levier $m\ l$, pouvant pivoter autour du point l. Quand le fil $f\ g$ est parcouru par un courant d'intensité efficace suffisante pour élever sa température d'une certaine

Digitized by Google

quantité, il s'allonge et le levier *m l*, peut venir fermer un contact *m*. Le fil *h i*, porte également en son milieu un cordon *o*, attaché à un levier pouvant pivoter autour d'un point et portant un contrepoids *p*. Tant que le fil *h i* n'a pas un allongement suffisant (ce qui dépend de l'intensité efficace du courant qui le traverse) le levier ferme le contact *r*; quand l'allongement du fil est suffisant le levier obéissant à l'action du contrepoids ferme le contact *q*.

Un point *n* du circuit d'excitation est relié au commutateur *m*, qui, quand le levier *m l* est abaissé, communique électriquement avec le point *r* du levier inférieur.

Si le commutateur *r* est fermé, le courant continu partant de *n*, passe par *n*, *m*, *l*, *r*, la bobine à fil fin B_2, la borne V et revient en *c*. Si le commutateur *q* est fermé, le courant partant de *n* passe par *q*, la bobine B_1 et revient par la borne V en *c*.

Les deux plaques *t*, sont suspendues à une chaîne qui passe sur une poulie *x* et sont équilibrées par un cylindre de fer doux, qui peut se déplacer à l'intérieur des bobines B_1 et B_2.

L'appareil fonctionne de la manière suivante :

Supposons que le voltage de l'alternateur (et par conséquent celui des deux bobines de l'armature) augmente, l'intensité du courant dans le secondaire du transformateur T augmente, les fils *f g* et *h i*, s'allongent, les commutateurs *m* et *q* ferment, un courant passe dans la bobine B_1 qui attire le cylindre de fer et fait descendre les plaques *t*. Ces plaques s'enfonçant dans le liquide électrolytique, la résistance du shunt diminue, l'intensité du courant en e_1 diminue, de sorte que l'excitation de E diminue et le courant dans e_2 baisse, ainsi que la tension aux bornes de l'alternateur.

Si au contraire, le voltage de l'alternateur baisse, l'intensité du courant secondaire de T diminue, les fils se tendent, le cordon *o* soulève le contrepoids *p* et le commutateur *r* ferme, un courant passe à travers les spires de la bobine B_2, ce qui fait abaisser le cylindre de fer doux, qui soulève les plaques *t* de sorte que la résistance entre ces plaques augmente. La résistance du shunt augmentant l'intensité du courant qui traverse e_1 augmente, ainsi que le courant d'excitation de l'alternateur dont le voltage remonte.

L'appareil pourrait fonctionner en supprimant le fil *f g*, et le levier *m l*, mais alors il est facile de voir que si le circuit secondaire du

Digitized by Google

transformateur T venait à être rompu le commutateur *r* serait constamment fermé, (si le fil *h, i,* lui-même n'était pas rompu) de sorte que l'excitation de l'alternateur et par conséquent son voltage s'élèverait de plus en plus.

Si au contraire, le fil *h i,* était rompu, le commutateur *q* serait fermé d'un manière permanente et l'excitation de l'alternateur et par conséquent son voltage baisserait de plus en plus.

Le fil *f g,* rompt la communication par le commutateur *m,* quand le circuit secondaire est interrompu, car il cesse d'être parcouru par un courant et il prend la position indiquée en pointillé, soulevant le le levier *k l.*

Le réglage s'effectue en déplaçant le contrepoids *p.* Le courant dérivé entre *n* et *c* ne cause aucun trouble dans le fonctionnement de l'excitatrice, en effet, les bobines B_1 et B_2 ont de très grandes résistances, de sorte que l'intensité de ce courant est très faible.

Il faut inverser de temps à autre la communication des plaques *t,* avec le circuit général d'excitation, afin de renverser l'action chimique du bain.

L'intérieur des bobines B_1 et B_2 est rempli de glycérine, dans laquelle plonge le cylindre de fer doux servant de contrepoids aux plaques *t,* ce qui amortit les mouvements.

L'appareil est ordinairement monté comme nous l'avons indiqué, mais il est bien évident qu'il pourrait être employé pour régulariser le potentiel en un point quelconque de la distribution. Dans ce cas, au lieu d'intercaler dans le primaire du transformateur T, deux des bobines de l'alternateur, il suffirait d'y intercaler le secondaire d'un transformateur, dont le primaire comprendrait les fils pilotes reliés au secondaire d'un transformateur placé au centre à potentiel constant.

Système Thomson-Houston. — Les alternateurs compound Thomson-Houston maintiennent automatiquement une différence de potentiel constante en un point donné de la canalisation (voir page 50).

Système Ganz. — (Zipernowski, Déry et Blathy),

La maison Ganz emploie deux sortes de régulateurs automatiques:

a) Un appareil maintient constante la différence de potentiel dans le circuit d'excitation.

b) Comme chaque circuit est alimenté par un alternateur spécial,

Digitized by Google

la constance du potentiel entre deux points donnés de chaque circuit, est obtenu en faisant varier l'excitation de l'alternateur correspondant, en introduisant une résistance variable dans le circuit dérivé du circuit général d'excitation (rhéostats r_1, r_2, r_3, fig. 298).

a) ***Réglage du potentiel du circuit général d'excitation*** (fig. 302).

Les inducteurs des alternateurs sont placés en dérivation sur le circuit général d'excitation et l'intensité du courant qui circule dans chacun d'eux peut être réglée, soit à la main, soit automatiquement au moyen des rhéostats r_1, r_2, etc.

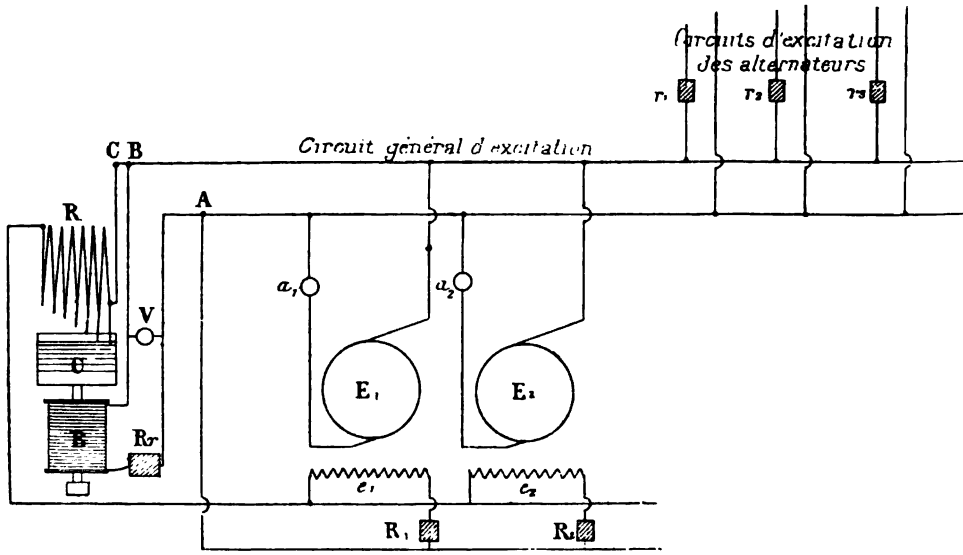


Fig. 302

Les excitatrices à courant continu E_1, E_2, sont également placées en dérivation sur le circuit général qu'elles alimentent. Leurs circuits d'excitation e_1, e_2, sont placés en dérivation, sur un circuit dérivé du circuit général, dans lequel est intercalée une résistance R variant automatiquement. Les rhéostats à main R_1, R_2, servent à régler une fois pour toutes l'excitation des excitatrices, de manière à ce qu'elles fournissent des courants de même intensité, ce que l'on vérifie au moyen des ampèremètres a_1, a_2.

Le voltmètre V, indique à chaque instant la tension dans le circuit général d'excitation.

La bobine B est parcourue par un courant dont l'intensité dépend

Digitized by Google

du voltage dans le circuit général. Suivant l'intensité de ce courant, une cuvette C, contenant du mercure, est plus ou moins abaissée.

Le rhéostat automatique R est constitué par des fils portant des prolongements verticaux de différentes longueurs.

Quand deux de ces prolongements plongent dans le mercure contenu dans la coupe C, la portion de fil comprise entre eux est en court-circuit et la résistance du rhéostat est diminuée d'autant.

On voit donc qu'à mesure que la cuvette monte, la résistance du rhéostat R diminue.

Quand le voltage dans le circuit général s'élève, l'intensité du courant circulant dans le solénoïde B augmente, la cuvette descend, la résistance R augmente et l'excitation des excitatrices diminue, de sorte que le voltage dans le circuit général baisse.

Quant au contraire, le voltage baisse dans le circuit général, la cuvette C remonte, la résistance R diminue, l'excitation des excitatrices augmente, de sorte que le voltage remonte dans le circuit général.

Le rhéostat R_r manœuvré à la main, est nommé le *potentiomètre*, il sert à régler une fois pour toutes le voltage que l'on veut maintenir constant dans le circuit général d'excitation, car on détermine ainsi l'intensité du courant circulant dans la bobine B.

La figure 303 indique les détails du rhéostat automatique.

La tige qui traverse le solénoïde est constituée à la partie supérieure par du fer et à la partie inférieure par du laiton, de sorte que le courant circulant dans l'électro-aimant tend à faire baisser l'ensemble. Cette tige est guidée par des poulies; à la partie inférieure elle porte un flotteur plongeant dans un réservoir plein d'eau qui équilibre le poids de l'ensemble, de sorte que cet ensemble est libre et peut obéir facilement à l'attraction du courant.

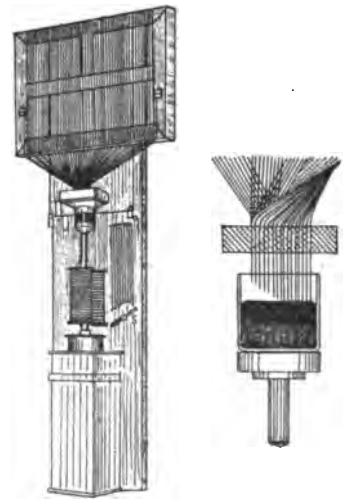


Fig. 303.

Ce dispositif, qui paraît compliqué à première vue, fonctionne cependant d'une manière très régulière.

Digitized by Google

b) ***Réglage du potentiel en un point quelconque du circuit primaire*** (fig. 304).

Dans l'usine, au départ du feeder est placé un transformateur T_1 nommé *égalisateur*.

Le primaire de ce transformateur est en série dans le circuit et le secondaire est relié par un fil A B à ce circuit.

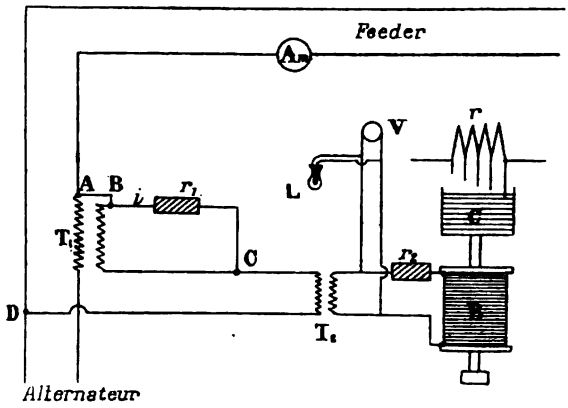


Fig. 304.

La f. e. m. efficace V_1 aux bornes du secondaire de l'égalisateur est proportionnelle à V tension efficace à l'usine. En A, C, il passe un courant d'intensité efficace i et la différence de potentiel entre C et D est $V_1 - r_1 i$.

La différence de potentiel au centre à potentiel constant est V — RI, on peut donc choisir r_1 (que l'on peut faire varier à la main) de manière que $V_1 - r_1 i_1$ soit exactement proportionnel à V — RI.

La f. e. m. aux bornes du primaire du transformateur T_2 est donc proportionnelle à la différence de potentiel du centre à potentiel constant. Les indications du voltmètre V, placé dans le circuit secondaire du transformateur T_2 lui sont également proportionnelles. Dans le circuit secondaire de T_2 est installé un appareil de réglage automatique à coupe de mercure, analogue à celui décrit précédemment, faisant varier la résistance r intercalée dans la dérivation du circuit général d'excitation desservant l'alternateur du circuit considéré.

Quand le voltage au centre à potentiel constant augmente, l'intensité efficace du courant qui circule dans la bobine B augmente, la cuvette C s'abaisse, la résistance r augmente et l'excitation de l'alter-

Digitized by Google

nateur et par conséquent la f. e. m. à ses bornes diminue, de sorte que le voltage baisse au centre à potentiel constant.

Quand, par contre, le voltage de la ligne diminue l'intensité efficace du courant circulant dans la bobine B diminue, la cuvette C remonte, la résistance r diminue, de sorte que l'excitation et la f. e. m. de l'alternateur croissent.

Les indications du voltmètre V et d'une lampe témoin L, permettent de faire varier à la main, une résistance intercalée dans la dérivation du circuit général allant à l'alternateur, dans le cas où l'on ne voudrait pas se servir de l'appareil automatique.

§ 5. — DISTRIBUTIONS AVEC EMPLOI DE CONDENSATEURS.

M. Boucherot, Ingénieur des services électriques de la société Wehyer et Richemond, a basé sur l'emploi simultané de bobines d'induction et de condensateurs, un système de distribution à intensité constante, très économique pour l'éclairage des grands espaces.

Il suffit de maintenir constant le potentiel à un centre pour que dans le circuit où sont placées les lampes en tension, l'intensité soit constante.

M. Boucherot a démontré (1er volume, page 67) que si l'on place en série sur une différence de potentiel constante, une capacité et une s. i. (sans résistance) telles que $k^2 \, L \, c = 1$, on peut recueillir dans un circuit (pouvant avoir de la capacité ou de la s. i.) placé indifféremment aux bornes de la capacité ou à celles de la s. i. un courant dont l'intensité est constante et que l'on a :

$$I_{eff} = \frac{E_{a\ eff}}{k\ L} = k\, c\, E_{a\ eff}$$

M. Boucherot, qui n'a pu encore expérimenter son système avec des lampes à arc, a procédé avec des lampes à incandescence à des expériences très concluantes.

Un transformateur, élevateur de tension fournissait, aux bornes du secondaire, dans lequel étaient intercalés un condensateur et une bobine de s. i., une tension constante de 2000 volts, à la fréquence de 40.

Digitized by Google

Dans un circuit que l'on pouvait mettre en dérivation, soit sur la capacité, soit sur la s.i., étaient intercalées 30 lampes à incandescence de un ampère et 30 volts.

La résistance pouvait donc varier de 30 ohms (une seule lampe dans le circuit) à $30 \times 30 = 900$ ohms (toutes les lampes en tension dans le circuit).

En éteignant un nombre quelconque de lampes, on ne remarquait aucun vacillement dans la lumière de celles restant allumées, même quand il n'en restait qu'une seule.

Ce mode de distribution serait très commode et l'installation très économique, pour l'éclairage de grands espaces par lampes à arc. On placerait à proximité de l'emplacement à éclairer, en série dans le circuit primaire à haute tension, un condensateur et une bobine de s. i. et aux bornes de l'un d'eux le circuit secondaire (à intensité constante) dans lequel seraient placées en tension toutes les lampes à arc. Pour éteindre une lampe il suffirait de tourner un commutateur la mettant hors circuit tout en n'interrompant pas le circuit.

§ 6. — DISTRIBUTIONS PAR COURANTS POLYPHASÉS.

Les courants polyphasés sont principalement employés pour la transmission de puissance à un grand nombre de petits moteurs, dans ce cas, le réglage du potentiel se fait très simplement en faisant varier soit automatiquement soit à la main, l'intensité du courant d'excitation.

Quand on veut placer des lampes sur le réseau, on peut les disposer de manière à les repartir aussi exactement que possible dans les circuits et on règle le voltage comme dans le cas précédent. Ce système est surtout applicable quand la puissance absorbée par l'éclairage est faible vis-à-vis de la puissance totale.

Quand, la distance sur laquelle se fait la distribution n'est pas très grande, on peut employer le système à courant biphasé avec fil de retour unique ou le système à courants triphasés avec montage en étoile, car dans ces cas, des variations même très fortes de résistances dans les circuits entrainent à de faibles variations des f. e. m.

Digitized by Google

et des décalages. Ces systèmes sont par contre à rejeter quand le réseau à un certain développement pour les raisons indiquées au chapitre V (page 289).

Quand le réseau de distribution a un certain développement, il faut employer le système de montage en étoile (pour l'usine centrale et les circuits secondaires des transformateurs) et si la puissance à fournir pour l'éclairage est importante, on distribue les lampes sur un des circuits. Ce système est employé par les ateliers d'Oerlikon et par la maison Siemens et Halske, pour la gare de Dresde.

Il suffit de régler de manière à maintenir le potentiel constant dans le circuit où sont installées les lampes.

Ce système a l'inconvénient de coûter assez cher de frais d'installation, les alternateurs devant être construits, de telle sorte que les trois circuits soient égaux et deux d'entre eux fournissent une puissance moindre que le troisième. De plus à la mise en marche de gros moteurs, il y a des vacillements de lumière.

A Dresde, pour éviter ce dernier inconvénient, M. Ulbricht a eu l'idée d'employer le système suivant. Pour la distribution de puissance, on emploie un ou plusieurs des alternateurs triphasés, suivant la puissance à fournir, puis au moment de l'éclairage on met en marche un ou plusieurs autres alternateurs, mais en ne fermant que deux de leurs circuits, au lieu des trois, ces deux circuits correspondant au circuit d'éclairage (monté en triangle, comme l'indique la fig. 305).

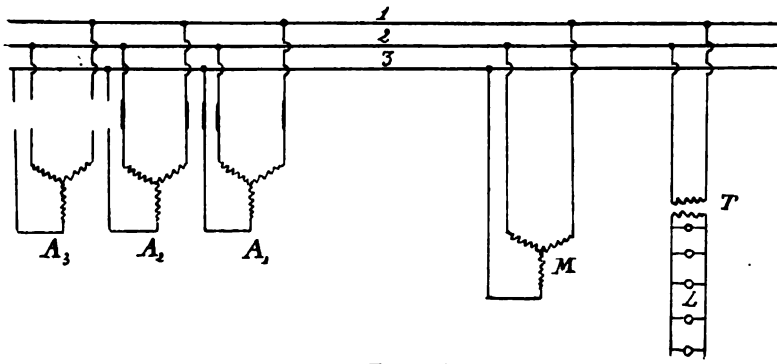


Fig. 305

Les lampes sont montées en dérivation en L, M représente un moteur. A_1 un alternateur triphasé, fournissant la puissance nécessaire aux

Digitized by Google

moteurs, A_2 un alternateur dont un des circuits, celui correspondant au fil 3, n'est pas fermé, A_3 un alternateur qui n'est pas en service.

M. Charles Proteus Steinmetz a imaginé un système de distribution, qu'il a nommé *le système monocyclique*, dans lequel les lampes fonctionnent sur un circuit monophasé et les moteurs sur des circuits triphasés, soit seulement au démarrage, soit pendant tout le temps de leur marche.

Le réseau primaire peut comporter trois fils ou deux fils seulement, le premier système peut être employé avec avantage quand le réseau est aérien, le second quand ce réseau est souterrain.

Système avec réseau primaire à 3 fils. (Fig. 306.)

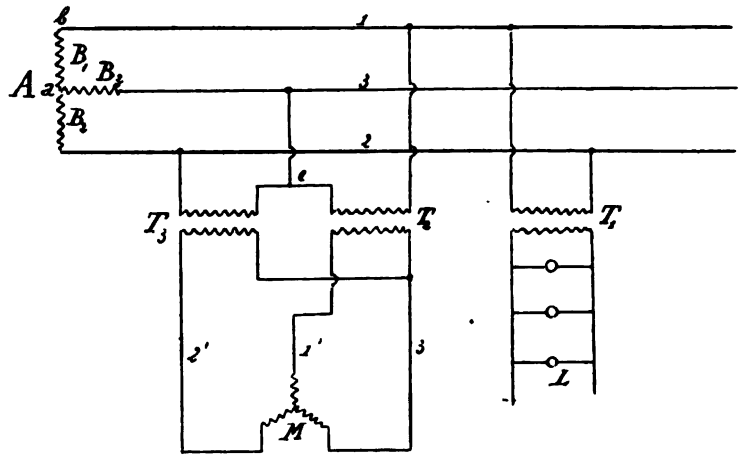


Fig. 306.

L'alternateur A est muni d'un enroulement ordinaire B_1, B_2 et d'un enroulement supplémentaire B_3 placé dans les intervalles du premier, de manière à produire une f. e. m. décalée de 90° par rapport à la première. L'une des extrémités de l'enroulement supplémentaire est reliée au milieu de l'enroulement B_1 B_2 en *a*, l'autre communique avec le fil de ligne 3. Les extrémités de l'enroulement principal sont reliées aux deux autres fils de ligne.

Le transformateur T_1 dans le réseau secondaire duquel sont branchées les lampes, a son primaire placé en dérivation sur les fils 1 et 2.

T_2 et T_3 sont deux transformateurs identiques dont les deux circuits primaires sont montés en tension et dont le milieu *e* est relié au conducteur 3.

Digitized by Google

Si (fig. 307), OA et OB représentent les f. e. m. développées dans les enroulements B_1 et B_2 et OC la f. e. m. développée dans l'enroulement B_3, il est facile de voir que OD représente la f. e. m. agissant dans le primaire de T_2 et OE celle agissant dans le primaire de T_3.

Les f. e. m. induites dans les secondaires de T_2 et T_3 pourront être représentées par OF et OG.

OG représente la f. e. m. dans le conducteur 1', OF celle dans le conducteur 2'. La f. e. m. dans le conducteur 3' sera la résultante de — OF et de — OG, soit — OH ou OH'. On voit que si les lignes OD et OE font entre elles un angle de 120°, les trois f. e. m. seront égales et décalées de 120°.

Dans ce cas, on doit avoir :

$$\frac{OA}{OC} = \text{tg } 60° = 1{,}732$$

$$OC = \frac{OA}{1{,}732} = 0{,}5774\ OA$$

c'est-à-dire que la f. e. m. développée dans l'enroulement supplémentaire, doit être environ le quart de celle développée dans l'enroulement principal $B_1 B_2$.

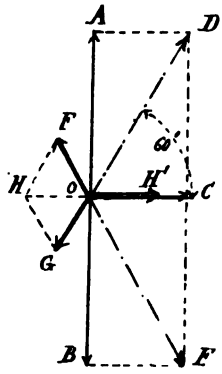


Fig. 307.

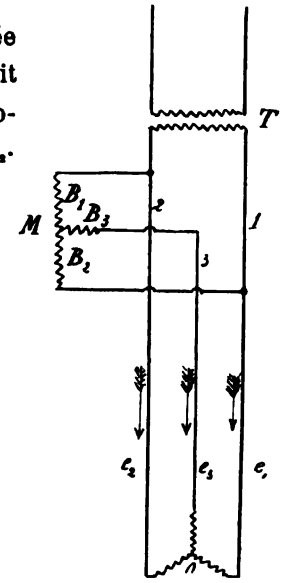


Fig. 308

Système avec réseau primaire à deux fils.

T (fig. 308) représente le transformateur monté en dérivation sur le réseau primaire à deux fils parcouru par un courant monophasé.

Digitized by Google

En dérivation sur les deux fils 1 et 2, reliés au circuit secondaire de ce transformateur, est monté un moteur synchrone M dont l'enroulement est B_1 B_2, ce moteur porte un second enroulement B_3 placé dans les intervalles du premier. Une des extrémités de B_3 est reliée au milieu de B_1 et de B_2 et l'autre au fil 3. La force contre-électromotrice développée dans l'enroulement supplémentaire est décalée de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à la f. e. m. celle de B_1 et B_2. M_1 représente un moteur asynchrone.

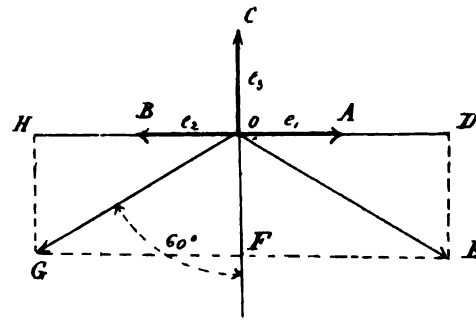


Fig. 309

Si e_1, e_2 et e_3 (fig. 309) représentent les f. e. m. développées dans les 3 fils ; la f. e. m. dans le circuit 1,0 sera $e_1 — e_2 — e_3$.

On a :

$$OD = 2\,OA = e_1 - e_2 \qquad OF = OC = -e_3$$

OE représente la f. e. m. dans le circuit 1,0

La f. e. m. dans le circuit 2,0 sera : $e_2 - e_1 - e_3$, il est facile de voir qu'elle sera représentée par OG.

La f. e. m. dans le circuit 3,0 sera :

$$e_3 - e_1 - e_2 = e_3$$

Il est facile de voir que si FOG = 60°, les trois f. e. m. seront décalées de 120°.

Pour réaliser cette condition, on doit avoir :

$$\frac{e_3}{e_1 + e_2} = \text{tg } 30° \qquad e_3 = 0{,}5774\,(e_1 + e_2)$$

Les trois f. e. m. ne sont pas égales, mais pour les moteurs il suffira

Digitized by Google

de proportionner le nombre de spires, afin d'obtenir des champs tournants uniformes.

Dans le système monocyclique les moteurs peuvent, soit fonctionner tout le temps comme moteurs triphasés, soit fonctionner au démarrage seulement comme moteurs triphasés, puis ensuite comme moteurs monophasés asynchrones. Dans ce dernier cas, on s'arrange pour que la force contre-électromotrice, dans le circuit 3' (fig. 306) ou dans le circuit 3,0 (fig. 308) soit très grande, de sorte que quand le moteur tourne à sa vitesse de régime (voisine du synchronisme) aucun courant ne circule dans le circuit correspondant.

§ 7. — DISTRIBUTIONS MIXTES

Dans les distributions mixtes, le courant alternatif à haute tension sert au transport de la puissance; à l'endroit où l'on veut utiliser l'énergie pour l'éclairage, on place un moteur actionnant une dynamo à courant continu.

Le premier exemple de distribution mixte est l'éclairage de la ville de Cassel. Le courant d'alternateurs monophasés, actionnés par des turbines, est envoyé dans la ville où des moteurs synchrones, actionnent des dynamos à courant continu, avec accumulateurs placés en dérivation.

A Bockenheim, la maison Lahmeyer a installé sur une distribution par courants triphasés des moteurs asynchrones servant de transformateurs rotatifs à courant continu (voir page 157).

A Budapest, la maison Schuckert a installé en dehors de la ville des alternateurs biphasés (fig. 310). Dans la ville sont installés des moteurs synchrones actionnant directement des dynamos à courant continu (voir page 127).

La compagnie Thomson-Houston, emploie également une distribution mixte pour les tramways électriques. A Lowell (Etats-Unis) la compagnie a disposé des sous-stations, desservant chacune une section, comportant un convertisseur rotatif de courants triphasés en courant continu.

A la station génératrice, un des alternateurs triphasés fournit

Digitized by Google

également le courant continu de manière à desservir la section voisine. Les sous-stations sont distantes de 6 à 7 kilomètres.

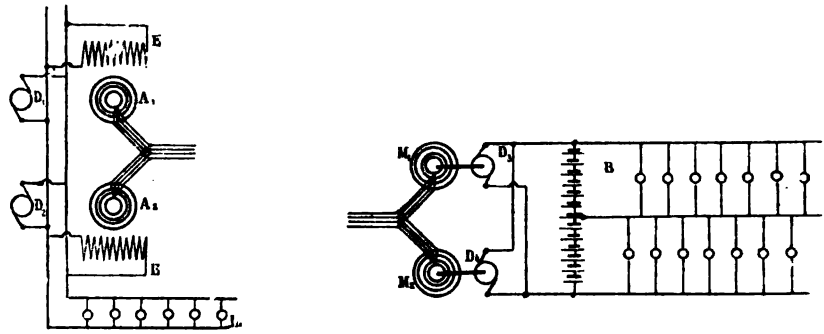


Fig. 310

Une installation semblable a été éxécutée par la compagnie Thomson-Houston, pour une ligne de tramways reliant Dublin à Pembroke.

§ 8. — LES CIRCUITS SECONDAIRES.

Les circuits secondaires peuvent être à deux ou plusieurs fils, il suffit de partager le secondaire du transformateur en un nombre de sections, comprenant chacune la même quantité de spires, égal au nombre des fils moins un, chaque fil partant des extrémités de ces sections.

Comme nous l'avons vu (page 397) deux dispositions générales peuvent être prises pour l'installation des transformateurs :

1° Les placer chez les abonnés ;

2° Les placer dans des sous-stations.

Lorsque la canalisation est souterraine, les transformateurs d'abonnés s'installent généralement dans les caves.

Lorsque la canalisation est aérienne, ces transformateurs peuvent s'installer dans les greniers ; en Amérique, dans ce cas, on installe les transformateurs, soit sur la façade des maisons, soit encore sur un poteau voisin.

Dans le cas où celà est possible, il vaut mieux installer le transformateur en dehors de la maison, sous un trottoir, par exemple. Dans tous les cas, le transformateur doit être placé à demeure dans

Digitized by Google

un local à l'abri de l'eau et du feu, ce local fermant à clef et la clef devant rester entre les mains d'une personne compétente.

Appareils de M. Swinburn. — Afin d'éviter la perte par hystérésis, qui, comme nous l'avons vu, prend une valeur relative très considérable, quand le débit du secondaire est faible, M. Swinburn a réalisé l'appareil automatique suivant (fig. 311), permettant de ne pouvoir

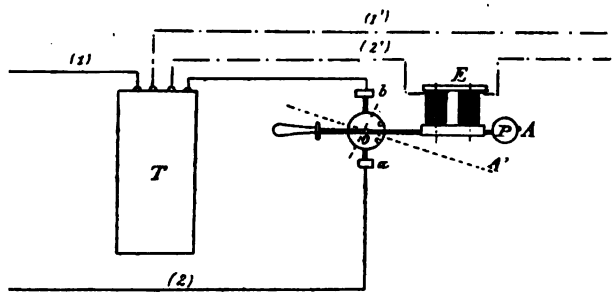


Fig. 311

éclairer un local que quand un certain nombre de lampes sont en service. Le circuit primaire (1) (2) est muni d'un commutateur *a b*, qui est fermé quand une barre OA est maintenue horizontale par l'attraction d'un électro-aimant E, intercalé dans le circuit secondaire.

Si l'intensité efficace du courant secondaire tombe au-dessous d'une certaine limite, l'attraction de l'électro, ne peut plus vaincre l'action du poids P, la tige OA prend la position OA' et le courant primaire est interrompu entre *a* et *b*.

Quand on veut rétablir le courant, on est forcé de mettre en service le nombre fixé de lampes et de ramener la barre OA, au contact de l'électro-aimant.

Dans les grandes installations particulières, M. Swinburn emploie deux transformateurs : l'un de petites dimensions, l'autre plus grand, pouvant fournir l'énergie pour l'éclairage maximum. Ce dernier peut être mis hors circuit par un commutateur automatique.

Quand, le grand transformateur étant en service, le débit baisse de manière à atteindre celui du petit transformateur, le commutateur est déclenché, il vient couper les circuits primaires et secondaires du grand transformateur et ferme le circuit secondaire du petit transformateur, qui entre alors en action.

Digitized by Google

Quand la dépense dépasse le débit du petit transformateur, il faut ramener à la main le commutateur pour intercaler le grand transformateur à sa place. On est averti d'avoir à procéder à cette manœuvre par la diminution d'éclat des lampes.

Appareils de réglage de la tension dans les circuits secondaires

Dans une installation secondaire importante, desservie par un transformateur, il se peut que les variations de voltage dépassent les limites admissibles pour le bon fonctionnement des lampes, de sorte qu'il faut prendre des dispositions pour parer à cet inconvénient. On peut, à cet effet, employer le dispositif de la Compagnie Westinghouse décrit (page 404, fig. 300). En enfonçant plus ou moins le noyau N du solénoïde S. Si la régulation n'est pas automatique, il faut placer le solénoïde dans la maison, c'est-à-dire y faire pénétrer les fils à haut potentiel, ce qui est dangereux.

La même compagnie emploie en outre pour la régulation du potentiel dans le circuit secondaire, deux autres appareils, le *régulateur de maison* (house regulator) et le *régulateur de théâtre* (stage regulator), qui agissent dans le circuit secondaire.

Dans le *régulateur de maison* (fig. 312), une bobine AD, qui agit par sa s. i. et qui en outre, est placée suffisamment près du transformateur pour être influencée par lui, est placée en dérivation sur le circuit des lampes.

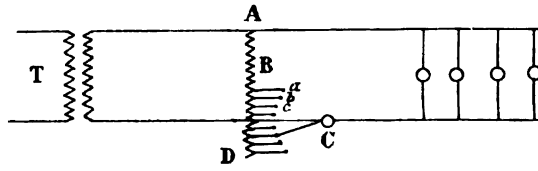


Fig. 312

On peut faire varier au moyen du commutateur C, le nombre des spires de cette bobine placées en dérivation et celui des spires placées en tension, de sorte que l'on peut faire varier le voltage aux lampes du circuit et même, grâce à l'induction du transformateur sur la bobine AD, leur faire dépasser le voltage aux bornes de ce dernier.

L'appareil est installé dans une boîte, et pour déplacer le commutateur C, il suffit de tourner un bouton. On amène ainsi un repère

Digitized by Google

placé sur ce bouton, en face de traits marqués au chiffre correspondant au nombre de lampes allumées.

Le régulateur de rampe (fig. 313) doit produire des différences de voltage plus importantes, car il faut à certains moments abaisser de beaucoup l'intensité lumineuse des rampes. Un solénoïde a un certain nombre de ses spires en série dans le circuit et les autres en dérivation sur celui-ci. Un noyau en fer doux N, ayant à peu près la longueur de la portion du solénoïde mise en dérivation peut se déplacer à l'intérieur de ce dernier.

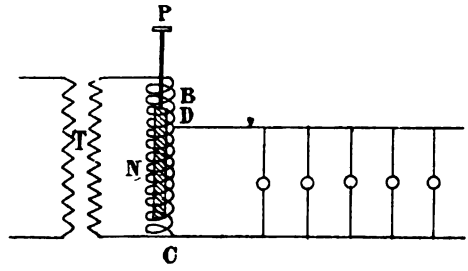


Fig. 313

Quand le noyau est au bas de sa course, la s. i. de la portion de la bobine qui est en dérivation est augmentée, la résistance apparente de cette dérivation est alors très grande, de sorte que les lampes brillent de tout leur éclat.

Au fur et à mesure que l'on relève ce noyau, on accroît la s. i. de la portion de la bobine, placée en série et on diminue celle de la portion placée en dérivation, de sorte que l'intensité des lampes diminue.

L'appareil a la forme d'une longue bobine horizontale et une poignée permet d'enfoncer plus ou moins profondément le noyau en fer doux.

Le dispositif de *régulateur de rampe* (1) de M. Muller de Nuremberg, est indiqué sur la figure 314.

A et A_1 sont les bornes du primaire, *p*, l'enroulement primaire, *s*, l'enroulement secondaire du transformateur.

Les diverses spires du secondaire sont reliées à des fils l_1, l_2, etc..., qui communiquent avec les diverses séries de lampes L_1, L_2, L_3, etc.

1. *Elektrotechnische Zeitschrift* du 11 octobre 1894.

Digitized by Google

On voit qu'en plaçant le levier h_1 du premier régulateur, de manière que la série de lampes L_1 communique avec l_8, on a le maximum de lumière, tandis qu'en le plaçant de manière que la communication ait lieu avec l_1, on a le minimum de lumière, dans l'intervalle on passe progressivement de la lumière maximum à la lumière minimum.

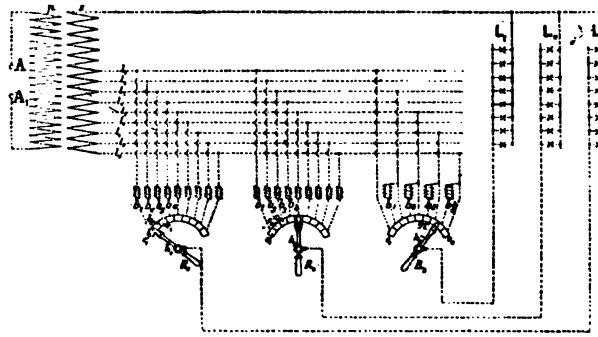


Fig. 314

Les bobines b_1, b_2, etc., sont disposées de manière à éviter l'effet du court-circuit entre deux spires successives du secondaire, elles agissent par leur s. i.

Au régulateur R_3 est indiquée une autre disposition permettant d'employer la moitié moins de bobines Celles-ci servent non seulement comme les précédentes, mais encore jouent le rôle de bobines à réaction. Quand le levier est sur c_3 et qu'on l'amène sur c, il y a diminution de lumière, quoique la même spire du secondaire soit en relation avec les lampes, car on introduit dans le circuit la bobine b_1.

On pourrait, par analogie à ce que l'on fait pour les réducteurs de batteries d'accumulateurs, placer une bobine à réaction entre deux touches du levier et éviter ainsi l'emploi d'un grand nombre de bobines, mais la construction du levier serait beaucoup trop compliquée.

M. E. Ries a appliqué le principe de la bobine à réaction, au réglage de l'intensité lumineuse, d'une seule lampe à incandescence.

La bobine à réaction avec noyau en fer est placée à l'intérieur du support. Les fils composant l'enroulement sont réunis en un câble et leurs extrémités sont soudées à un certain nombre de plots de contact.

Digitized by Google

Les différents fils sont reliés en série et au moyen d'un bras de contact, monté sur la clef de la douille, on peut faire varier le nombre de spires actives et par conséquent la s. i. et la résistance apparente.

Autrefois, pour régler l'intensité lumineuse, on devait intercaler plus ou moins de résistance dans le circuit de la lampe, ce qui avait l'inconvénient d'absorber de l'énergie en pure perte.

D'autres inventeurs avaient disposé des lampes à plusieurs filaments que l'on intercalait les uns après les autres dans le circuit, mais le système est incommode et coûteux.

Quand *les variations de voltage, dans le circuit secondaire,* ne dépassent pas les limites admissibles pour le bon fonctionnement des lampes, il faut choisir le voltage normal de ces dernières, de telle sorte qu'il corresponde à peu près à la demi-charge de ce circuit. On a ainsi le moins de différence, d'une part entre le voltage maximum et le voltage normal, d'autre part entre ce dernier et le voltage minimum.

§ 9. — APPAREILS SPÉCIAUX EMPLOYÉS DANS LES DISTRIBUTIONS DU COURANT ALTERNATIF.

Interrupteurs (1). — Les interrupteurs employés dans les distributions à haute tension, sont toujours doubles, c'est-à-dire qu'ils doivent rompre simultanément les deux parties du circuit.

La rupture doit être brusque et les plots doivent être placés à une certaine distance les uns des autres, suivant la longueur de l'étincelle de rupture dans l'air, qui dépend du voltage (voir les résultats d'expériences, § 5 chapitre VII).

Il est bon lors de l'emploi des hautes tensions, d'enfermer les interrupteurs dans des boîtes en verre ou en toute autre matière isolante, ne laissant passer que la poignée de manœuvre.

La maison *Ganz et C*^{ie} emploie, dans ses stations centrales, un commutateur spécial très ingénieux, qui permet de relier l'un quelconque

1. Voir dans la *Lumière Électrique* du 1er mars 1890 et du 30 avril 1892, la description de deux interrupteurs Ferranti.

Digitized by Google

des alternateurs de la station, à l'un quelconque des circuits primaires et de faire tous les changements sans amener d'extinction, ni même de vacillement de la lumière (fig. 315).

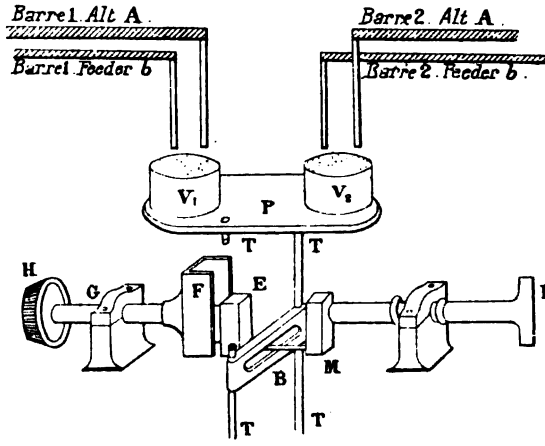


Fig. 315

Chacune des extrémités du circuit d'un alternateur est reliée à une barre portant autant de tiges verticales pendantes, qu'il y a de circuits de distribution.

Chacune des extrémités des circuits de distribution est également reliée à une barre portant autant de tiges verticales pendantes, qu'il y a d'alternateurs.

En reliant entre elles, au moyen de vases remplis de mercure, deux à deux les tiges verticales correspondant dans chaque couple, l'une à un alternateur, l'autre à un circuit extérieur, on établit la communication entre l'alternateur et le circuit primaire.

Les deux vases V_1 et V_2, contenant du mercure et servant à établir la communication entre un alternateur A et un circuit *b*, sont placés sur un plateau P, porté par deux tiges T (dont l'une sur la figure est interrompue), reliées entre elles par une traverse B. Cette traverse peut être abaissée ou soulevée par une manivelle M, portant à une extrémité une pièce rectangulaire E et à l'autre une poignée D_1 permettant de la déplacer horizontalement.

Quand la manivelle est placée de manière que la pièce E pénètre dans une coulisse F, adaptée à un arbre G, commandé par une roue conique H, la manivelle est solidaire de cet arbre, de sorte que lors-

Digitized by Google

que ce dernier fait un demi-tour, le plateau est soulevé ou abaissé. Quand la poignée est tirée, de sorte que la pièce E n'est plus en prise avec la coulisse, la manivelle n'est plus solidaire de l'arbre G.

Quand le plateau P est soulevé, le mercure contenu dans les vases ferme la communication entre l'alternateur et le circuit correspondant, quand le plateau est abaissé, la communication est interrompue.

Tous les arbres tels que G, sont commandés par des engrenages coniques, embrayant avec les roues H, par un arbre général, muni d'une manivelle permettant de leur faire exécuter une demi-révolution.

Quand on exécute cette manœuvre, toutes les paires de vases, pour lesquelles les pièces telles que E sont en prise avec les coulisses correspondantes sont soulevées ou abaissées, tandis que les autres restent immobiles.

Quand on veut remplacer un alternateur en service sur un circuit par un autre, on met en prise, au moyen des poignées D, les manivelles correspondant aux deux paires de vases à mercure, c'est-à-dire ceux du circuit et de l'alternateur en marche et ceux du circuit et de l'alternateur que l'on veut mettre en service.

On met alors en marche, sur une résistance appropriée, l'alternateur que l'on veut mettre en circuit, puis on fait faire un demi-tour à l'arbre de commande générale.

Les deux vases qui étaient soulevés et dont le mercure établissait la communication entre le premier alternateur et le circuit sont abaissés et à un certain moment cette communication est rompue. L'autre paire de vases a été soulevée et a établi un instant auparavant, la connexion entre le nouvel alternateur et le circuit.

Cette manœuvre est si précise que l'on n'observe aucun vacillement de la lumière des lampes à incandescence alimentées par le circuit.

La *Compagnie Westinghouse* emploie dans le même but, un commutateur spécial (1).

Au panneau correspondant à un feeder (fig. 316) se trouve le commutateur à l'aide duquel il est possible de relier cette artère à un

1. Eric Gérard. *Leçons sur l'électricité*, 2e volume.

Digitized by Google

alternateur ou à un groupe d'alternateurs et aussi de substituer rapidement un alternateur à un autre.

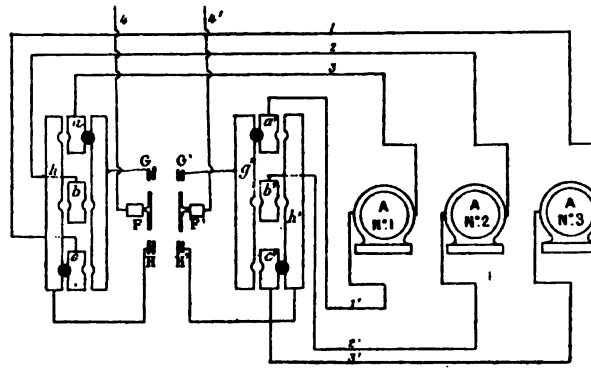


Fig. 316

La figure, donne le schéma des dispositions prises pour le cas de trois alternateurs. Ceux-ci communiquent par les circuits 1 1', 2 2', 3 3', avec des blocs de laiton *a*, *b*, *c*, *a'*, *b'*, *c'*, placés entre deux rangées de barres *h*, *g*; *h'*, *g'*. Des chevilles métalliques permettent de relier les blocs aux barres. Ces dernières sont raccordées d'autre part à un commutateur central dont l'organe principal est un levier double, dont les branches communiquent avec les deux conducteurs 4, 4' constituant le feeder.

Si l'on pousse le double levier vers le haut, on voit que l'on peut faire communiquer FF' avec GG'.

Si le levier est poussé vers le bas, c'est avec HH' que la liaison s'établit. Dans une position intermédiaire le levier relie à la fois FF avec GG' et HH'.

Pour connecter l'alternateur N° 1, avec le feeder, on placera les chevilles reliant respectivement les blocs *a* et *a'* aux barres *g* et *g'* et l'on relèvera la double clef.

On fera tourner une dynamo de secours, la N° 3 par exemple, à vide et à faible vitesse et l'on insérera des chevilles entre *c*, *c'* et *h*, *h'*.

Si l'alternateur N° 1 vient à manquer, l'agent préposé à la manœuvre du commutateur, demande au conducteur des machines de donner au N° 3 une allure normale. Il lui suffira alors d'abaisser brusquement le double levier, pour opérer la transposition, sans que l'on s'aperçoive de l'oscillation du courant dans le feeder.

Digitized by Google

On peut associer deux alternateurs en quantité, par exemple le N° 1 et le N° 2 après les avoir réglés à l'aide d'un synchroniseur de phases, en plaçant des chevilles entre *b*, *b'* et *g*, *g'*.

Bobine à réaction. — La bobine à réaction a été inventée par le docteur J. Hopkinson.

Cet appareil est analogue à un transformateur, mais ne comporte qu'un enroulement.

La bobine donne par sa s. i. une force contre-électromotrice qui peut être utilisée.

Par exemple pour faire marcher avec le courant continu sur une distribution à 100 volts, une lampe unique à 50 volts, on est obligé d'absorber 50 volts dans une résistance et de perdre inutilement de l'énergie.

La bobine à réaction dans le cas du courant alternatif agit par le décalage, c'est-à-dire produit une résistance apparente, l'énergie perdue est très faible, seulement celle due à la résistance du circuit de la bobine qui est très petite.

La figure 317 représente la forme la plus ordinaire des bobines à réaction (1).

Un enroulement de fil de cuivre, d'assez grande section, avec un nombre de spires relativement petit est placé sur une portion (environ un huitième de la circonférence) d'un anneau en fer laminé.

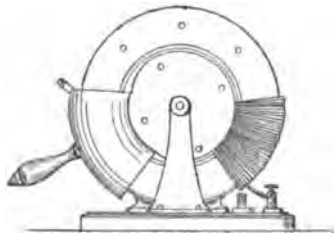


Fig. 317

A l'intérieur de l'anneau est placé un disque de fer laminé, pouvant tourner autour de l'axe de l'anneau, ce disque est placé tout près de l'anneau, sans cependant le toucher, il porte un manchon de cuivre, qui placé directement sur la bobine, a une largeur juste suffisante pour la recouvrir complètement.

Ce manchon forme en somme un circuit fermé de très grande section placé autour de l'anneau, dont il épouse exactement la forme en ne laissant entre ce dernier et lui, qu'un espace vide aussi réduit que possible.

Le principe sur lequel repose cet appareil de réglage est que la

1. *The alternate current transformer* par Fleming 2e volume, page 269.

Digitized by Google

présence d'un circuit secondaire fermé au-dessus d'une bobine primaire diminue grandement l'impédance de cette dernière. Donc quand le manchon est au-dessus de la bobine, l'impédance de cette dernière est très faible, au fur et à mesure qu'on en éloigne le manchon, l'impédance augmente.

L'inconvénient est que lorsque le manchon est directement au-dessus de la bobine, il est traversé par des courants intenses, d'où il résulte une perte appréciable d'énergie, mais l'avantage est que l'on peut faire varier la s. i. d'une manière continue sans rompre le circuit.

Cet appareil peut être employé pour régler la tension en un point d'un circuit, ou servir comme régulateur de rampe, pour faire varier l'intensité lumineuse d'une série de lampes à incandescence.

Plombs fusibles. — Pour le courant à haute tension, on doit employer des dispositions spéciales, pour empêcher la formation de l'arc lorsqu'un plomb a fondu.

M. Ferranti emploie à cet effet, des boîtes en grès cloisonnées, dans lesquelles sont placées les plombs. Ce système est excellent, mais prend beaucoup de place.

M. *Mordey*, place les fils fusibles dans un cylindre de verre, dans lequel est une poussière inerte, qui lors de la fusion empêche la formation de l'arc.

M. *Weston* a perfectionné le système Mordey, il place en dérivation deux fils fusibles, l'un de forte section, l'autre très fin. Le fil de forte section est placé comme un plomb ordinaire l'autre dans un cylindre rempli de poussière inerte.

Le fil de section la plus forte, fond le premier, mais l'arc ne s'établit pas, car le courant passe dans l'autre fil, qui fond à son tour, mais alors la poussière empêche l'arc de se fermer.

Les fils fusibles doivent avoir une certaine longueur, 50 m. m. au moins, car lorsque les fils sont courts, l'influence des griffes est énorme, ainsi par exemple, un fil de 12 m. m. de longueur peut supporter un courant d'intensité double, de celle que peut supporter un fil de 200 m. m. de longueur, de même section.

En 1884, M. Preece a indiqué la formule suivante pour calculer la section des fils fusibles :

$$i = a\, d^{\frac{3}{2}}$$

Digitized by Google

i étant l'intensité efficace du courant en ampères, d le diamètre du fil en m. m. et a une constante.

Pour le cuivre, $a = 10{,}244$, aluminum $a = 7{,}585$, platine $a = 5{,}172$, étain $a = 1{,}642$, une partie d'étain et deux de plomb $a = 1{,}318$, plomb pur $a = 1{,}379$.

M. Mathews, en reprenant les expériences de M. Preece a trouvé que ces chiffres étaient de quelques pour cent trop forts.

Il a en outre en comparant l'action du courant alternatif et du courant continu, trouvé que pour le courant alternatif, (à 132 et 250 périodes) au bout de 105 heures, la résistance électrique du plomb avait augmenté de 29,6 %, tandis que pour le courant continu elle n'avait augmenté que de 3,5 %. La résistance à la traction avait diminué de 7 % pour le courant alternatif et n'avait pas été altérée par le courant continu.

M. Mathews attribue ces phénomènes à une action moléculaire.

Dans une conférence faite à l'American Institut, en mai 1894 MM. Jackson et Ochoner ont donné les résultats d'expériences, qu'ils ont faites sur des fils fusibles pour 5 à 30 ampères. Le courant avait 125 périodes par seconde, le fil de 3 à 4 mètres de longueur était enroulé sur des cylindres isolants, la durée des expériences était de 500 à 550 heures.

Ils ont trouvé, contrairement aux résultats obtenus par M. Mathews, que l'augmentation de résistance ne dépasse pas 1,8 % et que l'intensité efficace du courant amenant la fusion n'avait pas diminué de plus de 2,2 %.

MM. Jackson et Ochoner attribuent ces modifications à la formation d'oxydes.

Paratonnerres. — Comme nous l'avons vu, les circuits aériens doivent être munis de paratonnerres, pour la protection des appareils qui y sont installés, particulièrement quand les lignes sont longues.

Dans un paratonnerre, l'intervalle entre la partie reliée au circuit et celle reliée à la terre, doit être plus grand que la distance explosive correspondant à la tension de distribution, tout en étant assez faible pour permettre à la décharge de la foudre de la franchir.

Les paratonnerres ordinaires à pointes à papier, à lames d'air, etc...

Digitized by Google

peuvent être employés dans le cas de circuits à basse tension, mais il n'en est pas de même pour les distributions à haute tension.

En effet, l'arc formé par la foudre entre les deux parties du paratonnerre, peut continuer à être alimenté par le courant à haute tension, de sorte que le circuit est mis à la terre. Il faut donc dans ce cas, que le paratonnerre après avoir laissé passer la décharge de la foudre brise automatiquement l'arc, pour le laisser se rétablir seulement dans le cas d'un nouveau coup de foudre.

On peut employer, pour rompre l'arc, qui en somme n'est qu'un courant électrique, plusieurs dispositions.

Profiter de l'effet de répulsion d'un électro-aimant, le souffler au moyen d'un courant d'air, faire écarter automatiquement l'une de l'autre les extrémités entre lesquelles il jaillit jusqu'à ce qu'il se rompe, employer un métal qui lorsqu'il brûle dégage des vapeurs éteignant l'arc ; profiter de la circonstance, que l'arc se continue beaucoup moins facilement entre une succession de points de décharges ou de vides placés en série qu'entre deux plaques séparées par un large vide

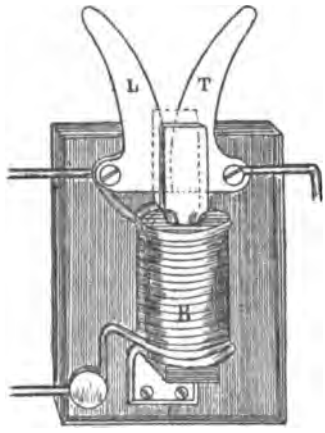


Fig. 318

Le paratonnerre *Thomson-Houston* est constitué par deux plaques métalliques L et T, ayant la forme indiquée sur la figure 318, c'est-à-dire très rapprochées à leur partie inférieure et s'éloignent ensuite de plus en plus l'une de l'autre.

La plaque L est en communication avec le fil de la ligne, qui est ensuite relié aux spires d'un électro-aimant B, la plaque T est reliée à la terre.

Quand une décharge atmosphérique se produit, un arc se forme entre les deux plaques. Si la tension du courant dans le circuit est très élevée, cet arc persisterait si il n'était repoussé par l'effet de répulsion de l'électro-aimant B, il remonte alors et comme la distance entre les deux plaques augmente, il ne tarde pas à être rompu.

Ce dispositif, a l'inconvénient d'introduire une s. i. dans le circuit, aussi pour les distributions par courants alternatifs, la compagnie Thomson-Houston emploie une autre disposition de l'appareil.

Digitized by Google

La bobine au lieu d'être parcourue par le courant alternatif, est placée dans le circuit reliant la plaque T à la terre, de sorte que l'arc est encore repoussé par l'effet de l'électro-aimant.

Les parafoudres de la Compagnie *Westinghouse*, sont basés sur le principe de l'extinction de l'arc par un courant d'air. Le premier appareil (1) (fig. 319) employé sur les circuits d'arc, a l'inconvénient d'introduire une s. i. dans le circuit.

Une bobine est placée dans le circuit d'éclairage, le courant pénétrant en C et sortant en C'. Quand le courant circule dans les spires de cette bobine, l'armature est soulevée et K occupe la position indiquée sur la figure. Une boule de charbon B est en communication avec la terre et deux pointes métalliques D et D', reliées à des leviers pivotant autour des points *o* et *o'* sont en communication chacune avec l'une des extrémités du circuit, en A et B.

On règle la distance des points D et D' de telle sorte qu'en temps ordinaire, aucun courant ne passe par la boule à la terre. Quand une décharge de la foudre se produit, il se forme des arcs entre les pointes D et D' et la boule, de sorte que l'électro-aimant n'est plus parcouru par un courant. Son armature n'étant plus attirée, tombe et appuie sur les leviers L et L' de sorte que les pointes D et D' s'éloignent de la boule de charbon.

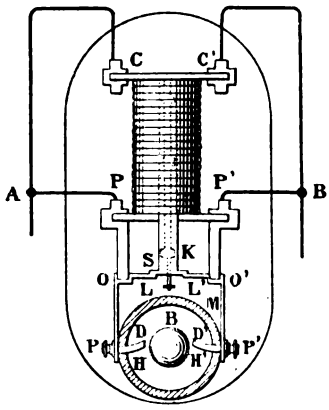


Fig. 319

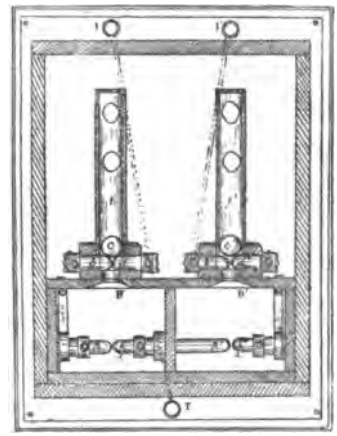


Fig. 320

Les arcs s'allongent donc et sont soufflés en même temps, par le

1. *Câbles d'éclairage électrique* par Stuart A. Russel, page 250.

Digitized by Google

courant d'air, dû à la dilatation de l'air renfermé dans la cavité M, dans laquelle est placée la boule, de sorte qu'ils sont bientôt rompus.

Le courant circule alors de nouveau dans les spires de l'électro qui attire alors son armature et permetle rapprochement des pointes D et D' de la boule.

Le deuxième modèle de paratonnerre de la compagnie *Westinghouse* a l'avantage de n'introduire aucune s. i. dans le circuit.

Cet appareil est construit de la manière suivante :

B et B' (fig. 320) sont deux cavités qui communiquent par l'intermédiaire des tuyaux *t* et *t'* avec l'extérieur.

La partie de gauche est intercalée dans l'un des conducteurs de ligne et la partie de droite dans l'autre, de sorte que l'on a en somme deux paratonnerres distincts. Le courant d'un côté pénètre en L, passe par la pointe de charbon *d*, qui est mise en communication avec la pointe *b*, et sort par une autre borne.

La pointe de charbon *p* est reliée egalement au conducteur, elle est placée à quelques millimètres de la pointe de charbon *i*, reliée à la terre.

Quand une décharge atmosphérique se produit, un arc se forme entre *p* et *i*, l'air se dilate dans l'espace B et sort par le tuyau *t* en soulevant la boule de charbon *c*, qui interrompt le circuit de sorte que l'arc entre *p* et *i* est rompu. L'air continu dans la cavité, B se refroidit alors et la boule *c* en retombant rétablit le circuit.

Toutes ces actions s'accomplissent pour ainsi dire instantanément de sorte que l'on s'aperçoit à peine de l'interruption du courant.

Le troisième modèle de paratonnerre de la compagnie *Westinghouse* (1) (fig. 321) repose sur le même principe que le premier. Dans une boîte fermée est fixé un charbon E, communiquant avec la terre, et deux charbons mobiles passant par des ouvertures pratiquées sur les deux côtés de la boîte. Les charbons mobiles sont attachés à des bras et chacun d'eux est relié à un fil de ligne. Quand une décharge de la foudre se produit, l'arc se forme entre chacun des charbons mobiles et le charbon fixe, l'air contenu dans la boîte se dilate, et chasse violemment les charbons mobiles qui sont projetés en dehors de la boîte et viennent frapper contre une butée en caoutchouc B.

1. Kapp, *Electric transmission of energy*; page 400.

Digitized by Google

Lorsque l'arc est éteint, l'air contenu dans la boite se refroidit et les deux charbons retombent à leur position première.

Le *paratonnerre Wirt* consiste en un certain nombre de plaques cylindriques de métal, isolées entre elles et placées parallèlement à une petite distance les unes des autres. Ces plaques sont formées d'un alliage de zinc.

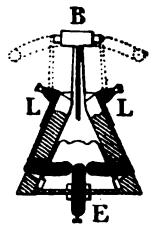
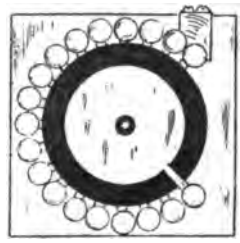


Fig. 321



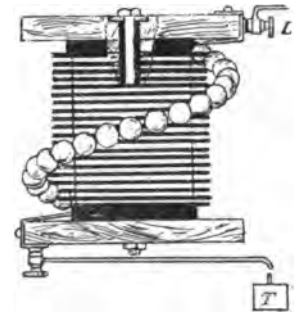


Fig. 322.

Pour une tension de 1.000 volts, on emploie sept plaques cylindriques, celle du milieu est mise à la terre et les deux extrêmes en relation chacune avec un fil de ligne. Quand la tension est plus forte, on augmente proportionnellement le nombre des rondelles.

La cause précise de l'extinction de l'arc, par l'alliage Wirt, n'est pas connue; il semble probable que lors du passage de l'arc le zinc est brûlé et que l'oxyde volatilisé forme une atmosphère non conductrice qui éteint l'arc.

Le parafoudre à brisures multiples de M. *Elihu Thomson* (1) (fig. 322), est basé sur le principe de la multiplication des points de décharge placés en série.

L'arc se continue beaucoup moins facilement quand les surfaces métalliques, entre lesquelles s'effectuent les décharges, sont très bonnes conductrices de la chaleur, un grand nombre d'arcs devant alors se former entre des surfaces métalliques froides.

L'expérience a de plus démontré que les pièces métalliques, entre lesquelles sont ménagés des vides successifs, doivent posséder une certaine capacité pour la charge statique, ceci facilite le saut de la décharge atmosphérique ou d'une charge statique subite entre les intervalles successifs.

1. *L'Électricien* du 28 mars 1891.

Digitized by Google

L'appareil se compose d'une série de plaques métalliques, séparées par des anneaux isolants en ébonite, dont chacun fait saillie en dehors des plaques métalliques. Chaque plaque est pourvue d'une projection latérale en queue, terminée par une borne de décharge sphérique qui n'est séparée, que par un très petit espace, de la borne de décharge de la plaque suivante. Le système est relié à la ligne L à une extrémité, et à la terre T à l'autre.

La disposition adoptée pour les plaques a pour effet de donner à celles-ci une certaine capacité statique ; les distances respectives des sphères de décharge peuvent être réglées comme on veut, en plaçant ces sphères en spirale autour de la colonne formée par les plaques et les anneaux isolants. Il est facile d'ajouter des plaques additionnelles au besoin, en dévissant le boulon central et superposant les nouvelles plaques et leurs anneaux isolants. Le même appareil peut donc ainsi être approprié aux exigences de toutes les lignes.

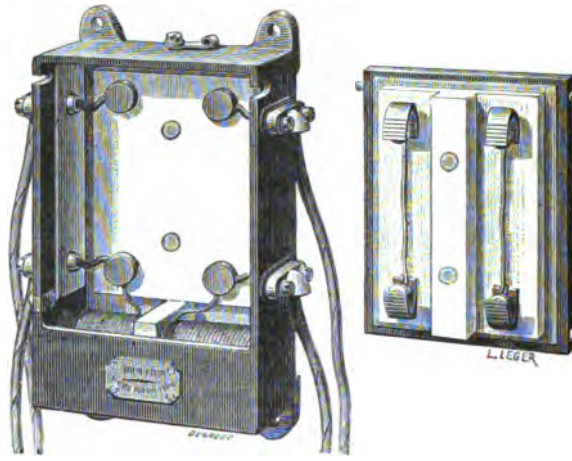


Fig. 323.

Le *paratonnerre Brown*, de la Société des Établissements Wehyer et Richemond (fig. 323), est basé sur le même principe que l'appareil Wirt.

§ 10. — INSTALLATION ET EXPLOITATION DES STATIONS CENTRALES.

a) Détermination de la puissance d'une station centrale.

Quand on a obtenu la concession de l'éclairage électrique d'une ville ou d'un secteur il faut déterminer le nombre et le genre de lampes à installer, ainsi que le nombre et la puissance des moteurs

Digitized by Google

qui pourront être alimentés, si on fait en même temps une distribution d'énergie.

Pour le début on peut provoquer des abonnements conditionnels, et tabler ainsi sur une certaine quantité de lampes à installer de suite, mais beaucoup de personnes ne veulent se déterminer qu'après avoir constaté la bonne marche de l'usine.

Il peut y avoir là une grande difficulté, car si d'une part on fait une première installation trop vaste, pendant un grand nombre d'années, une portion étant inutilisée l'intérêt et l'amortissement sont hors de proportion avec les recettes. Si, d'autre part la première installation est faite sur une trop petite échelle, il faut l'agrandir au bout de peu de temps, placer de nouveaux conducteurs principaux etc., ce qui revient beaucoup plus cher que si l'installation avait été complète dès le commencement.

Pour la partie mécanique de l'installation, en réservant l'espace dans les bâtiments on peut facilement augmenter ultérieurement la puissance sans beaucoup de frais supplémentaires, mais il n'en est pas de même pour les canalisations, surtout dans le cas où elles sont souterraines. On devra donc prévoir pour les câbles une section un peu plus forte que celle immédiatement nécessaire et quand la puissance maximum sera atteinte, on pourra même retarder un peu la pose de nouveaux câbles principaux, en consentant à une perte de charge un peu supérieure à celle donnant le plus d'économie des frais d'exploitation.

Les données de la page 282 peuvent servir à se rendre compte d'une manière approximative du nombre de lampes à installer.

M. Oscar von Miller de Munich, qui a installé un grand nombre de stations centrales, indique les chiffres suivants.

Pour l'éclairage particulier, par 100 mètres de développement de rue, de 30 à 60 lampes à incandescence de 16 bougies.

Pour 1000 habitants de 75 à 300 lampes à incandescence de 16 bougies.

Pour l'éclairage public, d'après M. von Miller, on peut compter pour 100 mètres de rue, de 1 à 2 lampes à arc ou de 2,5 à 4 lampes à incandescence de 16 bougies.

Le nombre et le genre des foyers destinés à l'éclairage public, sont le plus ordinairement déterminés à l'avance, à la suite de contrats passés avec les pouvoirs publics.

Digitized by Google

La consommation pour des moteurs à desservir est aussi assez facile à déterminer dans la plupart des cas, surtout quand l'on a affaire à de grands industriels.

Dans le calcul de la puissance de l'usine, on peut considérer que tous les moteurs ainsi que tous les foyers destinés à l'éclairage public peuvent être allumés simultanément. Pour l'éclairage particulier il n'y a jamais plus de 70 % des lampes allumées simultanément. Le rapport entre le total des lampes allumées simultanément et le total des lampes installées varie de 40 à 70 %, comme l'indiquent les données suivantes.

Kensington 40 %. Vienne 52 %. New-Castle on the Tyne 45 %. Cologne 70 %.

b) ***Détermination de l'emplacement de l'usine.***

Lorsque la puissance doit être empruntée à une chute d'eau, l'emplacement de l'usine est naturellement tout déterminé. Quand on emploie des moteurs à vapeur, il faut se préoccuper des moyens d'approvisionnement en charbon et en eau, l'usine qui peut toujours être installée en dehors de la ville, devra être placée à proximité d'un cours d'eau ou d'une voie ferrée.

On peut avoir à choisir entre divers points pour l'emplacement de l'usine, on prend alors celui pour lequel la dépense de cuivre dans la canalisation est minimum. (1)

On a un certain nombre de points ou centres de distribution, que l'on relie à la station en faisant parcourir aux câbles, un chemin aussi direct que possible.

Soient i_1, i_2, i_3, les intensités efficaces des courants circulant dans les câbles allant à ces divers points, l_1, l_2, l_3, les longueurs de ces divers câbles.

Pour une perte donnée en volts, le poids du cuivre d'un câble sera :

$$K i_m l'_m$$

K étant une constante, dépendant de la perte de voltage, de la résistance du métal employé, de sa densité, etc.

Le poids total du cuivre sera :

$$\Sigma K i_m l'^2_m$$

expression de la même forme que celle du moment des masses i_1,

1. Article de M. L. David paru dans l'*Electricien* de 1891, N° 2.

Digitized by Google

$i_2 \ldots i_m$, or on sait que ce moment d'inertie est minimum, quand l'axe passe par le centre de gravité des masses.

Le poids du cuivre des câbles principaux sera minimum quand la station centrale sera placée au centre de gravité du système déterminé en considérant les centres de distribution, comme des masses proportionnelles aux intensités des courants.

Pour tout autre point, le poids du cuivre, de même que le moment d'inertie, sera égal à la valeur du minimum précédent, augmentée du produit de l'intensité totale par le carré de la distance du nouveau point au centre de gravité. Ce supplément de poids ne dépendant que du rayon, restera constant si le nouveau point se déplace sur une circonférence, ayant pour centre, le centre de gravité.

On devra donc choisir l'emplacement le plus proche du centre de gravité du système déterminé en considérant les centres de distribution comme des masses proportionnelles aux intensités des courants.

c) Détermination de la section la plus économique des câbles principaux.

La loi de sir W. Thomson s'énonce ainsi :

La section la plus économique d'un conducteur est celle pour laquelle la dépense annuelle de l'énergie perdue est égale à l'intérêt et à l'amortissement de la partie de la dépense d'installation du câble, qui est proportionnelle à la section.

Dans le prix de revient de la puissance, on ne doit tenir compte absolument que des dépenses de combustible et de graissage, car les autres dépenses, personnel, entretien, etc., ne varient pas pour quelques pour cent en plus ou en moins.

Pour évaluer la puissance perdue annuellement, il faut connaître les courbes de consommation, que l'on peut déterminer approximativement par analogie avec celles d'une station centrale existante, placée à peu près dans les mêmes conditions.

On trouvera par exemple qu'annuellement, la distribution se fait avec l'intensité efficace maximum I pendant h_1 heures, avec les 9/10 pendant h_2 heures, avec les 8/10 pendant h_3 heures, etc... avec le 1/10 pendant h_{10} heures, etc.

On aura :

$$h = h_1 + h_2 + \ldots + h_{10} = 365 \times 24 = 8760 \text{ heures}$$

Digitized by Google

La puissance perdue sera :

$$R\,I^2 \left\{ h_1 + \overline{0,9}^2\, h_2 + \overline{0,8}^2\, h_3 + \ldots + \overline{0,1}^2\, h_{10} \right\} = p$$

Si on pose :

$$R\,I_1^2\, h = p$$

on aura :

$$I_1 = \frac{I\sqrt{h_1 + \overline{0,9}^2\, h_2 + \ldots + \overline{0,1}^2\, h_{10}}}{\sqrt{h}}$$

On a trouvé, en faisant le calcul, pour diverses stations centrales existantes que l'on a :

$$I_1 = 0,20 \text{ à } 0,31\ I$$

Supposons, (ce qui est à peu près le cas pour une station centrale de grande ville) que nous ayons les données du tableau ci-dessous :

NOMBRE D'HEURES h'	FRACTION de l'intensité maximum i'	$h'\ i'$	$h'\ i'^2$
50	1,00	50,00	50,00
110	0,90	99,00	89,10
150	0,80	120,00	96,00
150	0,70	105,00	73,50
190	0,60	114,00	68,40
200	0,50	100,00	50,00
350	0,40	140,00	56,00
500	0,30	150,00	45,00
1.000	0,20	200,00	40,00
3.000	0,10	300,00	30,00
3.060	0,05	153,00	7,65
8.760	»	1.531,00	605,65

L'intensité moyenne du courant est de :

$$I_m = \frac{1.531,00}{8.760} = 0,175$$

L'intensité I_1 à appliquer, pour le calcul de la section du câble est :

$$I_1 = \sqrt{\frac{605,60}{8.760}}\ I = \sqrt{0,0691}\ I = 0,273\ I$$

Digitized by Google

Si R est la résistance totale du conducteur, on aura si l est la longueur en mètres aller et retour et s la section en m. m².

$$R = \frac{0,02}{s} l$$

$$p = \frac{0,02}{s} l I_1^2 h$$

Le prix de revient de la puissance perdue, I_1 étant exprimé en ampères, sera :

$$\frac{0,02}{s} l I_1^2 h w$$

w étant le prix de revient d'un watt.

Pour l'évaluation du prix de revient p' du câble, par m. m² de section du cuivre, on pourra se servir des données de la page 344, ou des indications que pourront fournir les constructeurs.

Si la ligne est aérienne, on n'aura à considérer que le prix du cuivre, le poids d'un fil de 1 m. m² de section de 1 mètre de longueur étant de 0,009 kg.

Si a est l'intérêt et la dépréciation annuels pour cent, la dépense annuelle sera :

$$\frac{a p' s l}{100}$$

On devra donc avoir d'après la loi de Thomson :

$$\frac{0,02}{s} I_1^2 h w = \frac{a p' s}{100}$$

d'où :

$$s = I_1 \sqrt{\frac{2 h w}{a p'}}$$

Après avoir calculé s d'après cette méthode, il faut examiner si la section est suffisante, pour que le conducteur n'ait pas un échauffement exagéré.

d) Choix de la puissance des moteurs. — La question du choix et de la puissance des moteurs est l'une des questions les plus essentielles dans une usine centrale.

La puissance à fournir est excessivement variable et il faut faire en sorte que les moteurs travaillent autant qui possible à peu près à pleine charge.

Digitized by Google

En effet, un moteur fonctionnant à faible charge ne travaille pas dans des conditions économiques.

M. William a procédé à des expériences sur un moteur de 100 chevaux indiqués, soit de 90 chevaux effectifs et a trouvé les dépenses suivantes en eau :

Pour les 10 premiers chevaux, c'est-à-dire pour la marche à vide, 267 kgs.

Pour les 10 chevaux suivants 62,50 kgs, soit $6^{k},25$ par cheval.

La dépense par cheval était donc :

Pour un cheval utile . . . . . $267 + 6{,}25 = 273^{k},25$

Pour 50 chevaux . . . . . $\frac{267 + 50 \times 6{,}25}{50} = 11^{k},59$

Pour 90 chevaux . . . . . $\frac{267 + 90 \times 6{,}25}{90} = 9^{k},22$

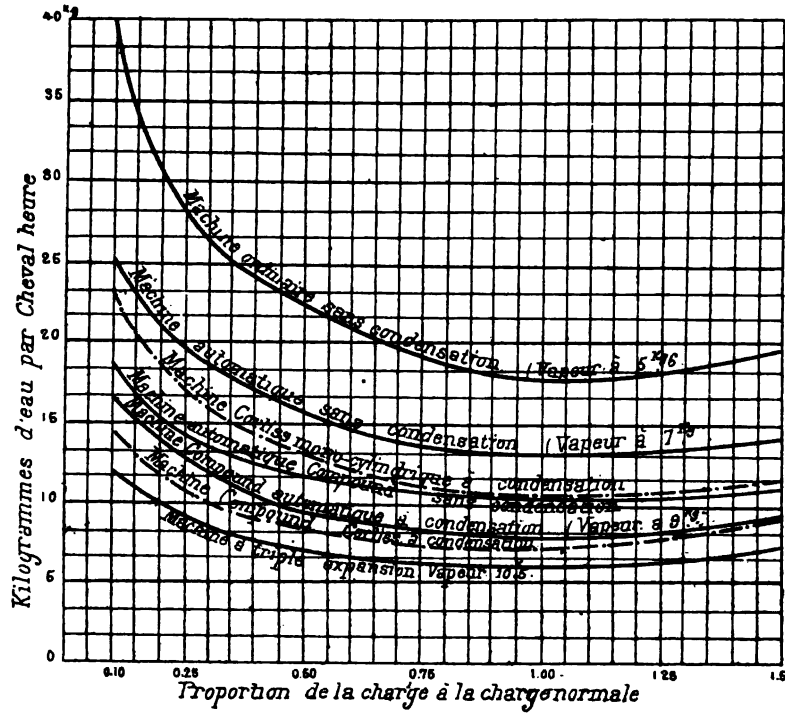


Fig. 324.

Les ordonnées des huit courbes de la figure 324 donnent la dépense de vapeur par cheval-heure pour les diverses sortes de moteurs à diverses charges, la charge normale étant 1.

Digitized by Google

Ces courbes ont été données par M. Carpenter dans une conférence faite à l'Institute of electrical engeneers de New-York, en mai 1893.

Le nom de machines automatiques est appliqué aux moteurs du genre Westinghouse.

(Les courbes avaient été dessinées par pounds d'eau par horse power hour, nous les avons tracées en kg. d'eau par cheval-heure, en admettant que le horse power hour vaut 1,0139 cheval-heure et le pound 0.45359 kg.).

Comme les alternateurs eux-mêmes ont un meilleur rendement à charge normale qu'à faible charge, on voit l'économie qu'il y a à faire travailler les moteurs autant que possible à pleine charge.

Afin de ne pas rendre la moindre réparation longue et difficile et de ne pas être obligé d'installer des appareils spéciaux pour le levage des pièces, il vaut mieux ne pas employer de moteurs de plus de 1.000 chevaux.

D'après la puissance maximum à fournir par l'usine, on choisira un certain nombre de grands moteurs de même puissance, puis on installera quelques moteurs de plus faible puissance, pour les cas de très faible charge de l'usine. Le total de la puissance des moteurs installés devra être plus grand que la charge maximum de l'usine, afin d'avoir un certain nombre de moteurs en réserve.

Ainsi, par exemple, pour une usine de 6.000 chevaux, on pourra prendre 11 moteurs de 600 chevaux, un moteur de 400 et un de 200 chevaux, on aura ainsi 1.200 chevaux de réserve.

e) Choix des moteurs. — Dans la plupart des cas, on peut commander les alternateurs directement, la partie mobile servant de volant à la machine.

Quand cependant le nombre de tours de l'alternateur, afin d'obtenir la fréquence donnée, est par trop élevé, il faut avoir recours soit à la commande directe par moteurs à grande vitesse, soit à la commande par courroie ou câbles.

Les moteurs à faible vitesse consomment en général moins de vapeur que ceux à grande vitesse, il coûtent moins cher de réparations et d'entretien, par contre leur prix de revient est plus élevé et ils exigent des fondations beaucoup plus considérables.

Les moteurs employés dans les stations centrales doivent avoir une grande regularité d'allure. C'est-à-dire que le nombre de tours par

Digitized by Google

minute doit être constant, ce que l'on obtient facilement avec un bon régulateur et qu'en outre, la vitesse angulaire doit être constante dans un tour.

La constance de la vitesse angulaire ne peut être obtenue même approximativement dans un moteur monocylindrique, qu'en employant un volant de grandes dimensions. A ce point de vue, les machines à deux cylindres avec manivelles à 90° sont déjà meilleures et les machines à triple expansion avec manivelles à 120°, les dépassent encore.

Les turbo-moteurs, au point de vue de la constance de la vitesse angulaire, sont excellents.

Jusqu'ici, on ne les avait guère employés, vu leur grande consommation de vapeur, mais il semble que la turbine à vapeur de Laval peut lutter à ce point de vue avec les moteurs ordinaires.

La consommation de vapeur par cheval de cette turbine n'augmente que très peu lorsque la charge diminue, c'est ce que montre la courbe de la figure 325, qui nous a été communiquée par la maison Bréguet, concessionnaire pour la France de la turbine Laval.

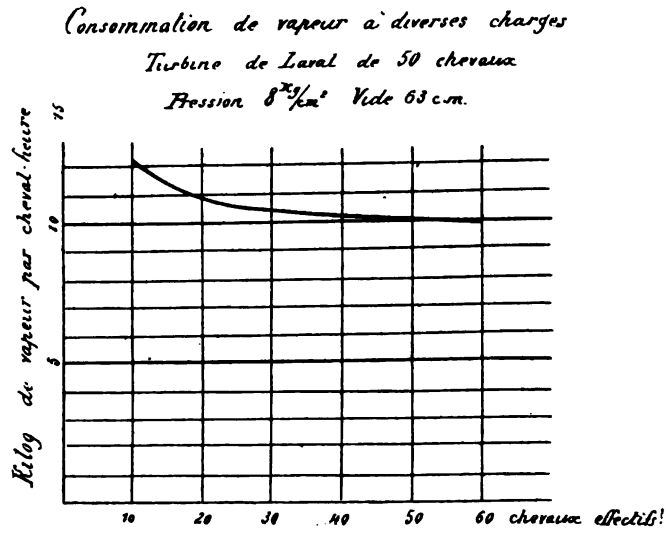


Fig. 325

M. Bayet, dans une séance de l'Association des Ingénieurs Electriciens de l'Institut Montéfiore, a communiqué les renseignements ci-

Digitized by Google

dessous sur le prix et sur l'espace occupé par les chaudières et les moteurs :

	MACHINE A VAPEUR		
	ordinaire dépensant 15 kil. de vapeur par cheval utile	compound dépensant 11 kil. de vapeur par cheval utile	à triple expansion dépensant 9 kil. de vapeur par cheval utile
Prix de la machine par cheval utile.	100 fr.	100 fr.	113 fr.
— chaudière — —	105	80 fr. 50	63
Prix total.	205 fr.	180 fr. 50	176 fr.
Espace occupé par la machine par cheval utile (en centimètres carrés).	950	120 à 130	110 à 300
Espace occupé par la chaudière par cheval utile (en centimètres carrés).	900	690	540

Il existe également des machines plus perfectionnées dépensant beaucoup moins de vapeur, mais le prix de revient en est plus élevé.

Des machines monocylindriques à détentes perfectionnées, comme les Wheelock, les Corliss, les Sulzer, etc., dépensent par cheval de 7 à 9 kgs de vapeur, mais le prix de revient est très élevé.

Le mieux est dans chaque cas, après avoir déterminé la puissance des moteurs, de dresser un cahier des charges et d'appeler à concourir les fabricants les plus connus.

Il est toujours bon, quand on le peut, de marcher à condensation; si on est à proximité d'un cours d'eau, celà est facile, dans le cas contraire, on creusera au besoin un puits.

Si l'on ne peut se procurer économiquement l'eau nécessaire, on pourra faire refroidir l'eau ayant servi à la condensation pour l'employer de nouveau.

Les divers systèmes de refroidisseurs sont les suivants :

1° Étangs refroidisseurs exigeant beaucoup de place, mais peu ou point de dépense d'énergie ;

2° Appareils à gradins, exigeant moins de place, mais un travail de 0,75 à 1 % de celui de la machine ;

Digitized by Google

3° Appareils à gradins et à fascines, exigeant encore moins de place mais un travail de 1 à 1,5 % de celui de la machine ;

4° Appareils à jets d'eau. L'eau finement pulvérisée au contact de l'air se refroidit et retombe dans un bassin, le travail exigé est de 1,5 à 3 % de celui de la machine ;

5° Appareils à gradin avec ventilation, peuvent être placés dans la salle des machines, exigent de 3 à 4 % de la puissance des machines.

Quand on marche à basse pression (7 kgs environ), la condensation procure une économie de charbon de 25 à 35 %. Cette proportion diminue à mesure que la pression de la vapeur employée augmente, on a encore une économie de 10 à 15 % quand on marche à une pression de 12 à 14 kgs.

La dépense d'eau pour la condensation varie de 25 à 30 litres par kilogramme de vapeur à condenser.

f) Chaudières. — Comme la consommation varie à chaque instant, les chaudières doivent pouvoir être mises rapidement en pression, être élastiques, c'est-à-dire pouvoir produire à un moment donné beaucoup plus de vapeur que normalement.

On doit donc pour ces raisons préférer de beaucoup les chaudières multitubulaires aux chaudières à bouilleurs et autres.

Comme la chambre d'eau et la chambre de vapeur, sont très petites, il faut les alimenter automatiquement ce qui peut se faire au moyen d'un flotteur et d'un accumulateur alimenté par une pompe.

L'espace occupé en plan par une chaudière tubulaire est d'environ 60 c. m.² par kilogramme de vapeur, et le prix de 7 francs.

Pour un mètre carré de surface de chauffe la quantité d'eau vaporisée est de 10 à 15 kilogrammes, la surface de chauffe est de 30 à 35 fois celle de la grille.

La surface de la grille se calcule de la manière suivante :

T étant la température de la vapeur à la pression de la chaudière, θ la température de l'eau d'alimentation ; on aura :

$$\lambda = 606{,}5 + 0{,}305\,(T - \theta)$$

$$p_s = \frac{P\,\lambda}{S\,N}$$

p étant le poids de charbon en kilogrammes brûle par mètre carré de grille (65 kilogrammes sans procédé spécial pour activer le tirage),

Digitized by Google

s étant la surface de la grille, P le poids de vapeur à produire par heure, N la quantité de calories dégagée par kilogramme de combustible (pour la houille N = 8.000). Le rendement de la chaudière varie de 0,40 à 0,75, ordinairement il est de 0,60.

g) *Cheminées.* On les construit ordinairement en briques, les cheminées en tôle ayant une durée beaucoup moindre ne servent guère que pour des installations provisoires.

La formule suivante sert à calculer les dimensions approximatives d'une cheminée.

$$H = \left(\frac{7\,P}{P + 30}\right)^{s}$$

H étant la hauteur P = ps le poids de combustible brûlé par heure, la section Ω est donnée par la formule

$$\Omega = \frac{0{,}8\,P}{100\,\sqrt{H}}$$

On ne descend guère pour H au-dessous de 20 m.

Dans le cas, où l'on ne marche pas à condensation on peut, pour activer le tirage, faire évacuer la vapeur par la cheminée.

On peut aussi :

1° Souffler de l'air au-dessous de la grille.

2° Envoyer un jet d'air dans la cheminée.

3° Employer un ventilateur aspirant.

Le premier système est le meilleur.

Un tirage de 15 m. m. exige un cheval et on peut brûler 137 kilogrammes de charbon par heure et par m². de grille.

Un tirage de 20 m. m. exige 1,5 cheval, on peut brûler 149 kg. de charbon.

Un tirage de 25 m. m. exige 2,2 chevaux, on peut brûler 166 kg. de charbon.

Un tirage de 30 m. m. exige 3 chevaux, on peut brûler 182 kg. de charbon.

h) *Installation générale.* — Il faut toujours prévoir dans l'aménagement une extension possible de l'usine.

Comme l'usine est ordinairement construite en dehors de la ville, le terrain est relativement bon marché et on a tout intérêt à ne pas construire des bâtiments à étages.

Digitized by Google

Les chaudières et les machines doivent être aménagées dans deux bâtiments accolés et les conduites de vapeur doivent être installées de telle sorte que l'un quelconque des moteurs puisse être alimenté par l'une quelconque des chaudières. Des vannes permettront d'isoler rapidement une partie quelconque des conduites. Les tuyaux doivent être entourés de calorifuge et munis de purgeurs.

Les chaudières doivent être disposées en batterie pour faciliter le service, on doit réserver l'espace nécessaire pour que l'on puisse, lors du nettoyage, retirer les tubes.

Quand l'installation est importante, il est bon de ménager au-dessous des cendriers une galerie par laquelle on peut enlever les cendres.

La salle des machines doit être munie d'un pont roulant assez élevé pour que l'on puisse passer les pièces d'une machine par dessus les autres.

Il faut prévoir dans l'usine des salles spéciales, servant de magasin à huile, à chiffons, etc.

Une salle d'expériences pour le réglage et les essais des lampes, les recherches photométriques, le réglage des compteurs, etc.

Un hangar ou un parc à charbon avec bascule, où l'on emmagasine le combustible amené à l'usine, qui est ensuite transporté aux chaudières au moyen de wagonnets.

Un atelier de réparation, muni des machines-outils indispensables pour effectuer les réparations urgentes qui peuvent être entreprises sur place.

M. O. Miller donne les chiffres suivants, pour le prix de revient d'une station centrale. Station par m.² 150 à 220 francs. Sous-station par m.² d'espace 15 à 30 francs.

Chaudières, moteurs, dynamos, tableau, etc., par cheval 300 à 500 francs.

Transformateurs, y compris ceux des maisons, par kilowatt 150 à 180 francs.

D'après M. Bayet, le prix de revient, tout compris, d'une usine centrale est de 700 à 900 francs par cheval.

D'après M. Picou, les frais d'entretien s'élèvent, pour les :

Bâtiments à.	2,5 %	du prix de revient
Alternateurs	3,0 —	—

Digitized by Google

Moteurs et chaudières.	5,0 %	du prix de revient.
Commutateurs-compteurs.	5,0	— —
Conducteurs	1 à 6	— —

i) *Exploitation.* — Une des questions principales pour l'exploitation d'une usine est de bien se rendre compte des différentes catégories de dépenses.

On devra chaque jour peser le charbon dépensé et établir la consommation par k. w. h.

Un enregistreur automatique de la pression aux chaudières permet de contrôler la bonne marche de la chaufferie.

On doit aussi relever fréquemment, au moyen des indicateurs, les diagrammes des machines à vapeur, afin de pouvoir remédier aux dérangements qui peuvent se produire dans les distributeurs, etc.

Diverses circonstances font varier le rendement de l'ensemble de l'usine, et la dépense en charbon; il faut considérer :

Le facteur de charge de l'usine, qui est le rapport du débit total de l'usine au débit possible à pleine charge.

Le facteur de charge varie énormément suivant les usines, et aussi suivant les périodes considérées; il atteint rarement 25 % pour la moyenne de l'année et reste ordinairement compris entre 7 et 10 %.

A la station de Saint-James, à Londres le facteur de charge est très élevé, il atteint 6,25 les jours d'été, 56 % au maximum et 24 % pour la moyenne de l'année.

A Kensington, le minimum est de 2,5 %, le maximum 2,5 %, et la moyenne 7,65 %.

Le facteur de charge d'une usine, est d'autant plus élevé que le nombre de lampes servant à l'éclairage public est plus élevé, car ces dernières sont presque toujours allumées simultanément. Ainsi par exemple à Chelmsford (1) où l'usine ne dessert presque pas d'éclairage privé, la moyenne de l'année est de 31 %.

Un moyen d'augmenter le facteur de charge d'une usine est de tâcher en réduisant le prix de l'énergie, d'obtenir dans la journée la fourniture du courant pour des moteurs ou pour des appareils de chauffage.

Il est du reste, très difficile de se procurer des renseignements

1. *L'Exploitation des stations centrales* par A. Pélissier. *Lumière électrique* du 10 septembre 1892.

Digitized by Google

précis au sujet des stations centrales et les chiffres donnés ci-dessus ne doivent être considérés que comme des approximations.

Les dépenses varient aussi considérablement d'une usine à l'autre, à Cologne (alternateur Ganz), du 1er avril 1892 au 31 mars 1893, les dépenses ont été les suivantes, par k. w. h.

Charbon	0.0766	soit	21,36 %
Eau, etc.	0,0106	—	2,95 —
Salaires	0,0746	—	20,80 —
Entretien, réparations	0,0910	—	25,34 —
Administration, etc.	0,1060	—	29,55 —
Total	0,3588	—	100,00 %

A Newcastle on the Tyne (alternateurs Mordey), les dépenses par k. w. h. ont été :

Charbon	0,0696	soit	22,75 %
Huile	0,0046	—	1,50 —
Divers	0,0061	—	2,00 —
Eau	0,0123	—	4,00 —
Entretien, réparations	0,0260	—	8,50 —
Personnel, usine	0,0857	—	28,00 —
— extérieur	0,0296	—	9,75 —
Frais généraux	0,0715	—	23,50 —
Total	0,3534	—	100,00 %

La durée d'allumage des lampes varie beaucoup, M. Picou donne la répartition, par nature de clientèle, de la consommation dans une ville française de province de 150.000 habitants, pendant les deux semaines d'équinoxe, qu'on peut considérer comme des semaines moyennes.

	Printemps	Automne
Cafés et cercles	0,280	0,260
Fabriques	0,210	0,225
Boutiques et magasins de détail	0,275	0,285
Bureaux et appartements	0,075	0,073
Théâtres et concerts	0,160	0,157
Total	1,000	1,000

La durée moyenne annuelle étant de 1.000 heures environ.

A Newcastle, la consommation moyenne étant de 784 heures par an, se répartit de la façon suivante :

Restaurants	1563 heures
Bureaux	499 —
Boutiques	459 —
Habitations privées	344 —

Digitized by Google

Facteur de consommation. — C'est le rapport du wattage vendu au wattage maximum possible.

Nous avons déjà dit que les lampes installées ne sont jamais allumées toutes à la fois et que le rapport du nombre de lampes allumées simultanément au nombre de lampes installées ne dépasse jamais 70 %.

Le rendement de l'usine c'est-à-dire le rapport du nombre de watts vendus au nombre de watts produits varie beaucoup.

Le rendement dépend de la charge des moteurs et des câbles. On augmente le rendement moyen en choisissant convenablement la puissance des moteurs, en installant des sous-stations de transformateurs (voir page 397), le rendement peut varier de 50 à 80 %.

A Newcastle on the Tyne, avec des transformateurs constamment branchés, le facteur de charge annuel était de 8,16 %, le rendement a été de 75 %, le facteur de charge ayant augmenté, le rendement s'est élevé à plus de 80 %.

La consommation de charbon par unité vendue varie dans d'assez grandes proportions, on peut l'estimer de 7 à 9 kilogrammes par kilowatt-heure, elle dépend naturellement du rendement moyen.

A l'usine de Cologne, la dépense serait de 8,06 kg. par kilowatt-heure vendu, à Londres de 9,100 kg. pour la station Métropolitan, de 9,440 kg. pour la House to House, à Newcastle de 9,540 kg., le charbon employé étant de qualité inférieure.

Digitized by Google

CHAPITRE VIII

Mesure industrielle des courants alternatifs

La mesure des divers éléments des courants alternatifs diffère considérablement de celle des courants continus. Seule la mesure de la résistance électrique proprement dite, ou ***résistance ohmique***, reste la même, mais, dans un grand nombre de cas, la connaissance de cette résistance a peu de valeur, car, au phénomène de l'absorption d'énergie par la résistance d'un conducteur, s'ajoute généralement l'effet de la self-induction qui, non seulement augmente cette perte, mais apporte aussi une perturbation en décalant les phases de la force électromotrice par rapport à l'intensité.

La ***résistance apparente***, qui représente la résistance au passage du courant, résultant de l'effet combiné de la résistance ohmique r, et de la self-induction est, comme on l'a maintes fois vu dans le cours de cet ouvrage, fonction de la fréquence du courant; sa valeur est donc variable pour un même circuit restant toujours identique à lui-même; comme cette résistance apparente satisfait à la relation (1er volume page 33) :

$$R_{app} = \sqrt{r^2 + k^2 L^2}$$

il est nécessaire de connaître r et L; r se détermine comme pour les courants continus par des méthodes bien connues, et pour lesquelles nous renvoyons à l'*Aide-Mémoire d'Électricité industrielle* de l'un des auteurs (1).

Ces mesures une fois faites, on devra chercher la valeur du radical ci-dessus pour chaque allure de l'alternateur, qui donne naissance au courant alternatif sur lequel on opère.

En pratique, les autres mesures que l'on est amené à faire le plus souvent peuvent se classer comme suit :

1. *Notes et Formules d'Électricité industrielle*, par Robert P. Bouquet (E. Bernard et Cie, éditeurs).

Digitized by Google

1° Mesure des forces électromotrices et des différences de potentiel efficaces;

2° Mesure des intensités efficaces;

3° Mesure des puissances;

4° Mesure des éléments instantanés d'un courant alternatif et tracé de courbes représentatives;

5° Mesures des différences de phases;

6° Mesure des self-inductions;

7° Appréciation de la qualité des fers;

8° Mesure du rendement des appareils à courants alternatifs.

Nous nous occuperons successivement de ces mesures dans l'ordre énuméré.

§ 1. — MESURES DES FORCES ÉLECTROMOTRICES ET DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL EFFICACES

Les mesures de forces électromotrices de potentiel efficace avec des *électromètres* très sensibles, dont les lectures se font par la méthode optique, avec emploi soit de la tache lumineuse, soit de de la lunette à réticule; dans ces méthodes, la déviation est indiquée par le déplacement d'une image reflétée par un miroir concave fixé sur l'équipage mobile de l'électromètre.

Nous n'avons pas à entrer dans la description des électromètres; nous n'indiquerons que leur mode d'emploi dans le genre de mesures qui nous occupe.

Pour ces mesures, le groupement des armatures et de la palette mobile de l'électromètre se fait suivant la *méthode idiostatique*. Pour bien faire comprendre ce groupement, rappelons que tout électromètre se compose de deux groupes de quadrants ou d'armatures, et d'une palette ou aiguille mobile. Dans l'application de la méthode idiostatique aux courants continus, on charge l'un des groupes d'armatures au potentiel V_1, et l'autre groupe, préalablement relié à la palette mobile, du potentiel V_2.

Dans ces conditions, la déviation obtenue satisfait à la relation :

$$\delta = K (V_1 - V_2)^2$$

Digitized by Google

K étant la constante de l'appareil. On voit donc que la différence de potentiel à mesurer est proportionnelle à la racine carrée de la déviation δ; il résulte de là que, dans l'emploi de l'électromètre avec les courants alternatifs, la différence de potentiel *moyenne* sera évidemment proportionnelle à cette même quantité $\sqrt{\delta}$; or, comme nous avons la relation

$$E_{eff} = \sqrt{(E^2)_{moy}}$$

entre la force électromotrice efficace et la f. e. m. moyenne, il s'en suit que l'on aura :

$$E_{eff} = \sqrt{\frac{1}{K}\delta}$$

et, par suite, un électromètre étalonné par des courants continus, pourra également servir pour des courants alternatifs.

Nous n'entreprendrons pas ici, la description des électomètres employés dans l'industrie et les laboratoires, ils n'offrent entre eux des différences qu'au point de vue des détails de construction.

La différence qui existe entre ces deux catégories d'instruments réside surtout dans le mode de suspension de leur équipage mobile.

Pour les laboratoires, où le soin est la première des qualités requises, on peut employer des électromètres avec suspensions à fil métallique très fin ou même à fil de cocon qui donnent à l'appareil une extrême sensibilité, mais par contre, une grande délicatesse qui entrave quelque peu la rapidité des mesures.

Pour l'industrie, on peut encore employer des suspensions à fil plus fort, mais comme appareil de fatigue on préfère des moutures à pivot ou à couteau qui permettent d'établir des voltmètres électrostatiques ayant la forme des voltmètres ordinaires habituellement employés pour les courants continus.

Lord Kelvin a imaginé un voltmètre spécial dit *voltmètre multicellulaire* dans lequel les armatures sont en grand nombre, de manière à augmenter le couple qui produit la déviation; ces appareils permettent d'obtenir avec des suspensions à fils robustes une déviation importante pour les potentiels usuels de 100 volts et au-dessus; mais pour des mesures très précises et des circuits particuliers, il

Digitized by Google

serait intéressant de savoir si ces appareils ne peuvent pas produire une perturbation dans le circuit par l'introduction de la capacité appréciable des armatures.

Comme seconde catégorie de voltmètres industriels, nous citerons les *voltmètres thermiques* dont les déviations sont produites par l'échauffement d'un fil sous l'influence du courant qui le traverse ; une aiguille se déplaçant sur un cadran gradué indique les variations de dilatation ; l'appareil se compose généralement de deux parties bien distinctes : d'abord la partie soumise à la dilatation puis une résistance non inductive qui donne à l'ensemble, la résistance nécessaire.

Comme d'après la loi de Joule, la chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant qui traverse le fil, il en résulte que la dilatation et par suite les indications de l'appareil sont proportionnelles au carré de l'intensité, partant au carré de la différence de potentiel aux bornes de l'appareil.

Avec des courants alternatifs, il est évident que la déviation de l'appareil sera proportionnelle à la moyenne des carrés des différences de potentiel. Il en résulte donc que la différence de potentiel *efficace* sera proportionnelle à la racine carrée des déviations et l'appareil pourra être étalonné avec un courant continu.

Les voltmètres industriels basés sur ce principe donnent des indications assez précises, mais ils ont le défaut d'être encombrants, car le fil soumis à la dilatation présente une assez grande longueur, de sorte que l'appareil nécessite des dimensions extérieures souvent considérables.

A une dernière catégorie d'appareils d'exactitude moindre se rapportent les *voltmètres à fer doux* que l'on emploie fréquemment dans l'industrie. De même que pour les courants continus, ces appareils exigent que le fer qu'ils renferment puisse être saturé par le plus faible courant qui traverse l'appareil, et de plus, il doit être étalonné pour une fréquence déterminée.

Ceci résulte évidemment de la nécessité de maintenir constante la perturbation due à la self-induction. Les appareils basés sur ce dernier principe ne doivent donc pas être considérés comme exacts ; ils ne peuvent que donner des indications plus ou moins approximatives.

Une des conditions nécessaires dans leur construction est de fendre

Digitized by Google

la bobine métallique qui reçoit l'enroulement suivant le plan déterminé par l'axe et un rayon; on élimine ainsi totalement les courants de Foucault intenses qui ne manqueraient pas de prendre naissance.

§ 2. — MESURE DES INTENSITÉS.

On peut procéder à cette mesure de deux façons : 1° on peut mesurer la différence du potentiel aux extrémités d'une résistance sans self-induction de valeur connue au moyen d'un voltmètre, un électromètre de préférence dont la capacité sera sans influence sur la valeur du courant qui circulera dans la résistance; cet effet perturbateur n'est pas à craindre, le plus souvent à cause de la très faible capacité des électromètres ordinaires; dans ces conditions la différence de potentiel étant en concordance de phases avec l'intensité du courant aux bornes de la résistance, on peut écrire simplement d'après la loi de Ohm, intensité $= \frac{\text{d. de p.}}{\text{résistance}}$; 2° on peut employer l'*électrodynamomètre* dont le type le plus connu est celui de Siemens.

Le premier procédé ne nécessite pas d'explications complémentaires, car il est des plus simples au point de vue théorique; en pratique, on en reconnaîtra l'avantage surtout pour les courants très intenses qui nécessiteraient un électrodynamomètre par trop volumineux et coûteux.

Le deuxième procédé est plus rapide et plus généralement employé que le précédent. D'ailleurs l'électrodynamomètre est peut-être l'appareil industriel le plus précis et à moins d'être soumis à des perturbations extérieures, reste toujours identique à lui-même. En principe dans l'électrodynamomètre, on utilise la répulsion qu'exercent l'un sur l'autre deux circuits l'un fixe, l'autre mobile traversés par des courants de sens inverses, le couple résistant est équilibré par un ressort antagoniste en spirale dont on mesure l'angle de torsion nécessaire pour amener le circuit mobile à une position invariable correspondant au zéro de la graduation; l'angle de deviation est proportionnel au carré de l'intensité du courant qui traverse les deux

Digitized by Google

circuits de l'appareil dans le cas d'un courant continu. Par suite dans le cas d'un courant variable, la déviation est proportionnelle à la moyenne des carrés des valeurs instantanées de l'intensité du courant, c'est-à-dire proportionnelle à l'intensité efficace, de sorte qu'il suffit d'étalonner l'appareil avec un courant continu d'intensité connue ; on détermine de cette façon, la constante K de l'appareil et pour une déviation quelconque δ de l'appareil, on aura :

$$\text{Intensité efficace} = K\sqrt{\delta}$$

L'électrodynamomètre quoique d'un maniement peu délicat, est cependant un appareil fort précis surtout à cause de la faible tension du ressort à spirale.

Son principe a été appliqué par Lord Kelvin à une série d'appareils de mesure pour l'industrie permettant, suivant les types, de mesurer de 1 centi-ampère jusqu'à 10.000 ampères. Ces appareils ont reçu le nom de *balances* et sont d'un emploi fort répandu en Angleterre ; ils sont d'une très grande exactitude.

Tous les électrodynamomètres en général n'ont pas suffisamment de spires pour être une cause de perturbation dans le circuit où on les intercale par suite de leur self-induction ; ils sont donc des plus précieux pour toutes les mesures de courants alternatifs.

Dans la construction des électrodynamomètres, il faut avoir soin de ne pas accumuler, pour la construction même de l'appareil, des masses métalliques trop considérables ; car les effets d'induction auxquelles ces masses seraient soumises réagiraient sur l'équipage mobile pour fausser les indications de l'appareil.

La mesure approximative de l'intensité des courants alternatifs peut encore se faire au moyen d'appareils industriels dits *ampèremètres* basés sur les mêmes principes que les voltmètres dont nous avons parlé c'est-à-dire à équipage mobile en fer doux ; les conditions de fonctionnement et les inconvénients de ces appareils restent les mêmes, seul le circuit change. Il faut observer en outre que la self-induction de ces appareils est suffisamment faible pour ne pas produire de perturbation dans les circuits où on les introduit ; de plus, à l'inverse de ce qu'il se produit pour les voltmètres, cette self-induction ne peut avoir pour résultat de modifier la valeur du courant qui passe dans l'appareil quand la fréquence change.

Digitized by Google

§ 3. — MESURE DE LA PUISSANCE.

La puissance d'un courant alternatif étant définie à un instant quelconque, caractérisé par la f. e. m. e et l'intensité i, par la relation

$$W = i \cdot e$$

ou par

$$W_m = E_{eff}\, I_{eff} \cos \varphi$$

pour la puissance moyenne pendant une période complète, il en résulte que l'on ne peut se servir de voltmètres et d'ampèremètres isolés qu'à la condition de connaître l'angle φ de décalage de la force électromotrice par rapport à l'intensité.

Pour opérer cette mesure au moyen d'une seule lecture avec un appareil d'un emploi pratique, il faut avoir recours au ***wattmètre*** qui dérive directement de l'électrodynamomètre.

L'un des circuits, formé de peu de spires d'un gros fil est traversé par le courant total à mesurer, l'autre circuit, formé de fil fin très résistant ayant le moins de self-induction possible est mis en derivation entre les points où existe la différence de potentiel à laquelle est due la circulation de courant; si donc la self-induction est nulle le faible courant qui circulera dans ce fil fin sera égal au quotient de la différence de potentiel par la résistance du fil, partant, proportionnel à cette différence de potentiel et en concordance de phase avec elle.

Il en résulte que la déviation du wattmètre étant, comme pour l'électrodynamomètre, proportionnelle au produit des courants qui circulent dans ses deux circuits, la déviation permanente dans le cas qui nous occupe sera proportionnelle à

$$\frac{1}{T} \int_0^T e\, i\, dt$$

qui donne comme résultat d'intégration

$$E_{eff}\, I_{eff} \cos \varphi$$

Le wattmètre peut donc donner en une seule lecture, la valeur de la puissance à la condition de ne pas être incommodé par les perturbations dues à la self-induction de chacun des circuits et à l'induction

Digitized by Google

mutuelle des circuits l'un sur l'autre. Mais en général ce n'est pas le cas et les wattmètres ne peuvent en général servir que dans des conditions données de fréquence pour lesquelles ils sont étalonnés.

Dans le premier volume (page 57), nous avons étudié analytiquement la question et nous avons trouvé que la valeur de la puissance était donnée en fonction de l'angle de déviation δ au moyen de la formule

$$W_m = \frac{r_1}{K} \frac{1 + k^2 C_{t_1}^2}{1 + k^2 C_{t_1} C_{t_2}} \delta$$

dans laquelle r_1 est la résistance du circuit à fil fin, K une constante, $k = \frac{2\pi}{T}$, C_{t_1} et C_{t_2} les constantes de temps respectivement du circuit à fil fin et du circuit à gros fil.

L'expression

$$\frac{r_1}{K} \frac{1 + k^2 C_{t_1}^2}{1 + k^2 C_{t_1} C_{t_2}}$$

que M. Fleming a désignée sous le nom de *facteur de correction* du wattmètre ne peut être constante que si l'on a :

$$C_{t_1} = 0$$

c'est-à-dire si le circuit à fil fin a une self-induction nulle,
ou bien

$$C_{t_1} = C_{t_2}$$

c'est-à-dire que les deux circuits ont même constante de temps. Dans ces deux cas le facteur de correction se réduit à $\frac{r_1}{K}$ et les lectures sont exactes quelle que soit la fréquence, mais ces conditions n'impliquent pas que le wattmètre n'amène pas de perturbation dans le circuit où on l'intercale car C_{t_2} est différent de zéro, c'est-à-dire que le circuit à gros fil présente de la self-induction; ceci ne doit pas avoir lieu en pratique de sorte que tous les efforts doivent tendre à avoir dans le circuit à gros fil $C_{t_2} = o$; ce qui a pour résultat de réduire le facteur de correction à l'expression :

$$\frac{r_1}{K} (1 + k^2 C_{t_1}^2)$$

La constance de cette quantité sera pratiquement d'autant mieux réalisée que C_{t_2} sera plus voisin de o. L'idéal serait donc d'avoir

$$C_{t_1} = C_{t_2} = 0$$

Digitized by Google

L'extrême sensibilité des appareils basés sur le principe de l'électrodynamomètre permet de réaliser assez bien cette condition, car il suffit de mettre peu de spires sur l'équipage mobile constitué par le fil fin, et de former le reste de la résistance r_1 nécessaire par une bobine à enroulement spécial sans self-induction placée à part et n'intervenant pas dans la réaction électrodynamique donnant lieu à la déviation.

De même que pour les électrodynamomètres, il est essentiel de ne pas faire entrer dans leur construction des masses métalliques qui pourraient fausser les mesures par la présence de courants de Foucault.

§ 4. — MESURE DES ÉLÉMENTS INSTANTANÉS D'UN COURANT ALTERNATIF ET TRACÉ DES COURBES REPRÉSENTATIVES.

Les méthodes d'inscriptions permettant d'obtenir des courbes de courants alternatifs dérivent plus ou moins de la *méthode du contact instantané* imaginée en 1881 par M. Joubert ; on ne peut guère en excepter que la méthode électrochimique de M. Paul Janet.

La méthode de M. Joubert consiste à faire la mesure dans un temps infiniment petit, correspondant exactement au même point de chaque phase, les impulsions instantanées qui sont ainsi communiquées avec la même intensité un grand nombre de fois par seconde, produisent dans l'appareil de mesure, une déviation permanente dont la valeur variera avec l'instant auquel se fera la mesure dans chaque phase.

Pour arriver pratiquement à ce résultat, on installe sur un prolongement de l'arbre de l'alternateur, un petit commutateur à double contact, se composant d'abord d'une pointe disposée radialement et contre laquelle vient toucher, pendant un moment inappréciable, un balai fixe ; cette pointe communique d'autre part avec un anneau métallique qui forme la deuxième partie du commutateur et sur laquelle frotte constamment un deuxième balai.

Si l'on désire mesurer par exemple la différence de potentiel instantanée existant entre deux bornes de l'alternateur, on dispose entre elles un électromètre par exemple, communiquant d'une part

Digitized by Google

directement avec l'une des bornes et d'autre part avec l'autre borne par l'intermédiaire du commutateur que nous venons de décrire.

Cette disposition permettra de communiquer à l'électromètre une déviation permanente qui donnera la valeur de la quantité instantanée à mesurer, correspondante au point de la phase où se fait le contact instantané de la pointe et du balai.

Pour étudier complètement un courant périodique quelconque, on fera une série complète de mesures correspondant à une phase complète, en donnant au balai fixe de petits déplacements angulaires, toujours dans le même sens autour de l'axe de rotation du commutateur.

Chaque mesure correspond à un nouveau point de la phase infiniment voisin du précédent; en portant suivant une échelle convenable, les résultats de ces mesures en ordonnées sur une feuille de papier en observant entre ces ordonnées un écartement exactement proportionnel au déplacement angulaire que l'on a fait subir au balai fixe; on obtient une série de points qui, reliées entre elles, par une ligne continue, fournissent une courbe représentative du courant alternatif à étudier.

Cette méthode graphique expérimentale est la seule qui permette d'étudier et de connaître sûrement le fonctionnement d'un appareil quelconque à courants alternatifs, car elle s'applique à la fois à tous les éléments intéressants d'un pareil appareil et les courbes représentées sur la même figure exactement dans leurs positions relatives permettent de juger d'un seul coup d'œil du fonctionnement, aussi bien du reste que cela a lieu avec les diagrammes que l'on tire sur les moteurs à vapeur.

De plus les déformations quelquefois locales d'une certaine région de la courbe ne peuvent être décelées d'aucune autre façon.

Cette méthode de Joubert offre cependant l'inconvénient d'obliger l'opérateur de faire une série de mesures; il serait donc infiniment préférable d'obtenir automatiquement un tracé continu; c'est ce que M. Blondel a réalisé en se servant de la photographie. Les déviations de l'appareil de mesure sont accusées par le déplacement d'un rayon lumineux qui après réflexion sur le miroir concave de l'électromètre ou du galvanomètre, vient tomber sur une pellicule photographique sensible enroulée sur un cylindre. Un même mouvement d'horlogerie

Digitized by Google

actionne en même temps ce cylindre et le balai à contact instantané, ces deux mouvements sont donc proportionnels ce qui est une condition essentielle à réaliser pour avoir une courbe à l'échelle. L'image du point lumineux reflété par le miroir vient impressionner la pellicule et trace sur elle une courbe continue qui représente la variation du courant alternatif.

Ce mode de mesure, fort ingénieux, n'est évidemment pas très industriel, mais en pratique courante on n'a évidemment pas à faire de mesures aussi délicates et dans un laboratoire elle est facilement réalisable.

M. Blondel au lieu d'employer un électromètre sensible, préfère employer un condensateur ordinaire chargé par le contact instantané et envoyer la décharge par un autre contact instantané dans un galvanomètre apériodique genre Deprez-d'Arsonval.

Pour éviter les vibrations des balais mobiles au moment où ils rencontrent les petites tiges produisant le contact instantané, M. Blondel préfère noyer ces tiges dans des disques isolants soigneusement tournés à la surface, lesquels affleurent ces tiges ou lames de cette façon les balais frottent continuellement et n'éprouvent aucun soubresaut au moment de leur passage sur les contacts.

Il existe une autre disposition assez simple pour obtenir le contact instantané. Elle consiste à remplacer le balai par une petite veine liquide conductrice très fine dirigée normalement à l'axe de rotation du commutateur et s'écoulant sous une pression assez forte, la tige de contact est remplacée par une lame très mince bien affûtée montée dans un plan radial qui coupe la veine liquide sans produire d'éclaboussures. On emploie comme liquide de l'eau par exemple que l'on peut aciduler pour augmenter sa conductibilité.

Avec cette disposition on ne peut donner au jet liquide qu'un déplacement angulaire relativement faible autour de sa position verticale supérieure, pour ne pas introduire d'erreur due à la courbure que prendrait la veine liquide quand elle ne s'écoulerait plus dans une position voisine de la verticale.

Toutes les méthodes que nous venons d'examiner sont d'une application relativement commode quand on est à proximité de l'alternateur qui produit le courant sur lequel on opère; mais cette circonstance est loin de se trouver réalisée dans le cas général.

On peut alors procéder très simplement comme l'a fait M. Fleming:

Digitized by Google

il monte le commutateur dont nous venons de nous occuper sur l'arbre d'un petit moteur synchrone construit spécialement pour absorber très peu d'énergie de manière à produire à la fois peu de perturbations dans les phases de la force électromotrice et de l'intensité du courant et de manière à tourner en synchronisme aussi complet que possible avec l'alternateur-générateur. M. Fleming a reconnu que ces conditions pouvaient être réalisées très suffisamment en pratique. De cette façon en un point quelconque d'un réseau de courants alternatifs on peut faire l'étude graphique des éléments intéressants à connaître.

§ 5. — MESURE DES DIFFÉRENCES DE PHASES.

Cette mesure se présente rarement; elle n'a d'ailleurs aucune portée pratique excepté quand on veut se rendre compte du fonctionnement d'une installation ou d'un appareil. Par exemple dans l'étude d'un alternateur ou d'un transformateur, il est utile et même indispensable de connaître le décalage de la force électromotrice par rapport à l'intensité pour le circuit primaire et le circuit secondaire. Mais lorsqu'on se livre à ces études complètes, l'établissement des courbes graphiques, dont nous avons parlé dans le paragraphe précédent, devient indispensable, et dans ces conditions, il n'y a plus à faire de mesure de différence de phases, car sur ces courbes mêmes, on peut lire ces différences de phases pour n'importe quels éléments entre eux.

Pour faire uniquement la mesure de la différence de phase entre deux courants isolés dont les valeurs instantanées au même moment sont i_1 et i_2, voici comment on peut opérer : les expressions de ces deux courants décalés l'un par rapport à l'autre de l'angle φ peuvent s'écrire

$$i_1 = I_1 \sin kt$$
$$i_2 = I_2 \sin (kt - \varphi)$$

Nous prendrons trois électrodynamomètres, dont deux seront respectivement traversés par chacun des deux courants, tandis que le troisième sera parcouru par les deux courants à la fois, l'un d'eux cir-

Digitized by Google

culant dans le circuit fixe tandis que l'autre circule dans le circuit mobile; nous aurons respectivement pour les dérivations des trois électrodynamomètres.

$$\delta_1 = \frac{I_1^2}{2}$$

$$\delta_2 = \frac{I_2^2}{2}$$

$$\delta_3 = \frac{I_1 I_2}{2} \cos \varphi$$

d'où nous déduisons

$$\cos \varphi = \frac{\delta_3}{\sqrt{\delta_1 \delta_2}}$$

Cette méthode n'est pas générale puisqu'elle suppose que les courants suivent la loi sinusoïdale ce qui est loin d'être le cas général. Pour mesurer la différence de phase de deux courants de forme quelconque, il n'existe pas d'autre méthode précise que celle qui consiste à mesurer le décalage sur les courbes tracées expérimentalement.

§ 6. — MESURE DES SELF-INDUCTIONS

La connaissance de la self-induction est comme l'on s'en est rendu compte maintes fois, de la plus haute importance dans les questions de courants alternatifs, mais par contre sa mesure est fort difficultueuse et très délicate; elle ne présente d'ailleurs toute l'exactitude nécessaire que dans le cas de circuits à perméabilité constante c'est-à-dire des circuits ne renfermant par de fer. Pour les circuits à perméabilité variable, il faut avoir recours à des méthodes simplement approximatives qui permettent de se faire une idée sur la valeur de la self-induction.

Comme mesure précise pour les circuits à perméabilité constante, nous indiquerons les deux méthodes de MM. Ayrton et Perry.

1re *Méthode d'Ayrton et Perry.* — La bobine à expérimenter, étant placée en L (fig. 326) dans un pont de Wheatstone, on établit un commutateur C, animé d'un mouvement de rotation uniforme et qui produit à chaque tour les effets suivants :

Digitized by Google

a. Etablissement et suppression d'un court-circuit entre les bornes du galvanomètre.

b. Ouverture et fermeture du circuit de la pile.

Suivant le calage des balais, on modifie l'intervalle qui sépare ces deux effets.

Pour faire les mesures, on peut procéder de deux façons différentes :

1° On règle d'abord le pont pour le courant permanent; puis le commutateur étant mis en marche, on enlève des résistances de la branche DC jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre redevienne nulle.

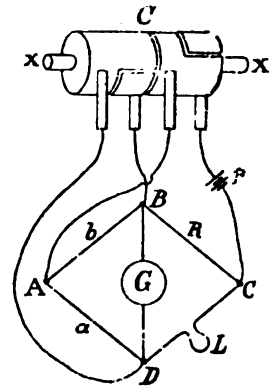


Fig.326

2° Pratiquement, il est plus commode d'opérer de la façon suivante : l'équilibre étant obtenu pour le régime permanent, on dérègle le pont en enlevant une certaine résistance ρ de la branche CD ; puis on met le commutateur en marche et on augmente sa vitesse jusqu'à ce que le galvanomètre revienne au zéro; on mesure la vitesse du commutateur et l'on déduit facilement du nombre de tours, le temps T qui s'écoule entre le moment où le circuit est formé et celui où le galvanomètre est mis en court-circuit.

Dans ces conditions, le coefficient de self-induction est :

$$L = T\rho$$

Au lieu de mesurer T sur le commutateur lui-même, il est préférable de le déterminer électriquement au moyen d'une bobine à self-induction connue.

La précision de la méthode augmente avec le nombre de tours, quand toutefois, ce dernier ne dépasse pas une certaine limite. A cet effet, si en variant le nombre de tours du simple au double, on obtient pour L la même valeur, on peut sans inconvénient augmenter la vitesse de rotation.

2° *Méthode d'Ayrton et Perry*. — Dans cette méthode, on emploie un pont A B C D formé d'abord de deux branches *a b* non inductives puis en R de deux bobines dont l'une peut se déplacer angulairement par rapport à l'autre de manière à régler la self-induction λ de l'ensemble comme on l'entend. En L on dispose la bobine dont on

Digitized by Google

veut mesurer la self-induction. Un galvanomètre communique avec les points B et D tandis qu'une pile est reliée aux points A et C. On commence d'abord par établir l'équilibre pour le régime permanent au moyen d'une résistance à curseur. Puis on fait passer dans l'appareil des courants interrompus en ouvrant et en fermant la clef de la pile, on maintient l'équilibre dans ces conditions en faisant varier la self-induction λ. Quand l'équilibre est obtenu d'une façon invariable, on peut écrire

$$\frac{L}{\lambda} = \frac{a}{b}$$

d'où

$$L = \frac{a}{b}\lambda$$

Cette formule est facile à établir, le lecteur que ces développements intéresseraient les trouverait dans les *Leçons sur les mesures électriques* d'Eric Gérard.

La sensibilité de cette méthode est d'autant plus grande que l'on peut donner au courant de la pile le plus grand nombre d'interruptions par seconde. A cet effet MM. Ayrton et Perry ont imaginé un petit commutateur tournant qui produit périodiquement la fermeture et l'ouverture du circuit de la pile en même temps que la fermeture du circuit du galvanomètre ou sa mise en court-circuit sur lui-même; les courants instantanés se trouvent toujours envoyés dans le même sens dans le galvanomètre et les déviations sont ainsi rendues permanentes. Les connexions du pont avec le commutateur ainsi que la forme ce dernier ne sont évidemment pas celles représentées sur la figure 326.

Une pareille méthode pourrait s'appliquer évidemment à un circuit de perméabilité variable avec plus ou moins d'exactitude, mais il est évident que comme la self-induction est variable avec la valeur du courant, il faudrait employer les courants intenses qui traversent généralement ces circuits, courants qui ne pourraient pas circuler dans les appareils de laboratoire employés pour cette mesure.

Dans la pratique courante, on peut employer la méthode Joubert qui permet d'avoir une idée grossière sur la valeur de la self-induction dans les conditions même de travail de l'appareil. Voici comment on opère : en série avec l'appareil à essayer, on met une résistance sans self-induction, une série de lampe à incandescence ou un bac avec liquide conducteur et électrodes, soient R la résistance de l'appa-

Digitized by Google

reil à essayer et R' la résistance en série, faisons y passer un courant d'intensité efficace I_{eff} et mesurons au moyen d'un électromètre les différences de potentiel e et e' aux bornes des résistances R et R', dans ces conditions l'intensité efficace est exprimée par la relation :

$$I_{eff} = \frac{e'}{R'} = \frac{e}{\sqrt{R^2 + k^2 L^2}}$$

d'où l'on tire

$$L = \frac{1}{k}\sqrt{R'^2 \frac{e^2}{e'^2} - R^2}$$

On voit qu'il est inutile de mesurer séparément e et e', il suffit d'en avoir le rapport c'est-à-dire le rapport des déviations de l'électromètre.

Cette méthode a le défaut d'être basée sur la supposition que le courant est sinusoïdal mais même dans ces conditions elle est suffisante pour une évaluation grossière.

§ 7. — APPRÉCIATION DE LA QUALITÉ DES FERS

Pour tout ce qui concerne les courants alternatifs, on a guère à se préoccuper dans les appareils de la perte par courants de Foucault. Il est, en effet, évident qu'avec les tôles minces voisines de trois dixièmes de millimètre que l'on emploie; les courants de Foucault ne peuvent acquérir une bien grande importance; la source de la plus grande absorption d'énergie est l'hystérésis, elle seule suffit quelquefois pour maintenir partiellement en charge les usines de production pendant les heures d'inactivité, il s'en suit donc qu'il est important de se rendre compte de la qualité d'un fer à ce point de vue quand on désire construire, par exemple, un transformateur. Ceci ne veut pas cependant dire que l'on peut négliger les qualités de ce fer au point de vue de la perméabilité, mais comme les qualités de bonne perméabilité et de faible hystérésis ne se trouvent pas nécessairement réunies dans le même échantillon il s'en suit que l'on est forcé de se livrer à deux genres de mesures pour pouvoir bien juger d'un fer proposé. Pour les appareils à courants continus,

Digitized by Google

comme les dynamos, la première qualité est la seule requise, car les variations de polarité ne sont pas suffisamment fréquentes par minute pour entrainer une perte notable par hystérésis.

Nous nous occuperons d'abord de la mesure de la perméabilité.

1° *Mesure de la perméabilité.* — Dans les ateliers de construction, la méthode la plus simple est celle de M. Sylvanus P. Thomson, avec l'emploi de son *perméamètre.*

Cet appareil se compose d'un gros cadre très massif en fer doux A, percé d'un trou *a* dans lequel peut s'engager une tige *cd* du métal à essayer ; cette tige est entourée par une bobine *ad* qui produit la force magnétomotrice nécessaire.

A moyen d'une balance à ressort *r* ou d'un plateau chargé de poids (l'appareil étant supposé tourné sens dessus dessous) on mesure la puissance attractive qui se développe au point *d* de l'appareil ; au lieu de produire l'arrachement par une petite augmentation de l'effort mécanique seul, il vaut mieux diminuer un peu le courant, de cette façon on ne communique pas d'ébranlement à l'appareil.

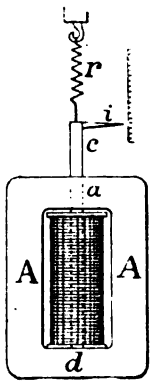


Fig. 327

La force P produisant l'arrachement est donnée par la formule

$$P = \frac{B^2 s}{8\pi \times 981}$$

P étant exprimé en grammes et *s* étant la section de la tige en centimètres carrés ; la perméabilité μ a pour expression

$$\mu = \sqrt{\frac{8 P \pi \times 981}{H^2 s}}$$

Comme on connaît $H = 4\pi ni \times 10^{-1}$, on en déduira facilement μ.

Cette méthode, quoique peu exacte, peut être fort utile dans les ateliers de construction où l'on a souvent plutôt besoin de faire des comparaisons que des mesures exactes.

Le défaut de cette méthode, comme du reste de bien d'autres, est d'exiger l'emploi de joints qui diminuent toujours la perméabilité du circuit total. Dans le cas présent surtout, le joint présente une fort petite surface et exige, par suite, un ajustage fait avec beaucoup de soin.

Digitized by Google

Pour des mesures plus précises, il faut mieux déterminer la perméabilité μ d'apres des courbes de magnétisme complètes, comme celles d'Ewing, tracées pour un cycle complet.

Si nous prenons un solénoïde très long par rapport à son diamètre et que nous mettions comme noyau une tige du métal à essayer, nous pourrons, au moyen d'un galvanomètre balistique, mesurer le flux Φ qui traverse la section moyenne de la tige; si celle-ci a une section s, le flux par unité de surface sera :

$$B = \frac{\Phi}{s}$$

Comme d'ailleurs nous connaissons le champ H qui est égal à :

$$\frac{4\pi ni \times 10^{-1}}{l}$$

l étant la longueur du solénoïde, nous obtenons facilement :

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Souvent on met le métal sous forme d'anneaux entièrement recouverts par l'enroulement primaire : le circuit secondaire étant placé en un point quelconque.

Dans tous les cas, la forme de l'échantillon doit être telle que l'intensité du champ H, dû au solénoïde excitateur, soit constant dans une région assez considérable. Pour un échantillon cylindrique et court le champ en un point quelconque est dû en partie au champ du solénoïde et en partie aux pôles des extrémités de l'échantillon.

On est donc conduit à adopter un cylindre de métal à essayer et un solénoïde aussi longs que possible, 40 fois au moins le diamètre, plus même si c'est possible; dans ces conditions, le champ est à peu près constant sur toute la longueur. On arrive au même but en employant un échantillon sous forme d'anneau; on n'a pas ainsi à redouter l'influence des extrémités.

Quand on désire avoir une série de valeurs de BH pouvant servir à construire la courbe d'hystérésis, on ne doit pas interrompre le courant primaire ; on augmente subitement, à reprises successives, le

Digitized by Google

courant magnétisant et l'on mesure à chaque fois, l'impulsion communiquée au galvanomètre balistique; chaque point de la courbe est obtenu en cumulant toutes les impulsions précédentes du galvanomètre depuis l'induction spécifique, correspondant à $H = O$. Cette méthode a un défaut, c'est que toute erreur commise, affecte tous les points de la courbe déterminée dans la suite de l'opération.

Nous croyons que la méthode de MM. Vignoles et Evershed offre plus de commodité que tout autre au point de vue de l'exactitude : sur un anneau du métal à expérimenter, sont disposés trois enroulements (fig. 328) : le premier ou enroulement secondaire S est en communication avec le galvanomètre balistique G : les deux autres ou enroulements primaires sont destinés à produire la force magnétisante. L'un d'eux est parcouru par un courant invariable produisant un nombre d'ampères-tours — n (nous prenons un signe pour distinguer ces amp.-t. de ceux du deuxième enroulement) tels que sous leur action, le flux engendré correspond au point inférieur d'une courbe d'hystérésis d'Ewing.

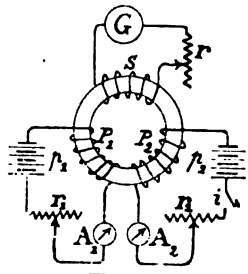


Fig. 328

Le deuxième enroulement est parcouru par un courant variable donnant des amp.-t. de sens contraire à ceux que nous venons de considérer et pouvant varier de 0 à $+ 2 n$; on voit donc que les amp.-t., agissant réellement sur le fer, seront égaux à la somme algébrique des amp.-t., des deux enroulements primaires et que le fer pourra être soumis à des f. m. m. variant de n à $+ n$ amp.-t.

Dès lors, pour faire une expérience, on fait d'abord circuler le courant constant dans le premier enroulement et dans le deuxième on met des résistances en quantité suffisante pour qu'en fermant le circuit, la somme algébrique des amp.-t. donne la valeur voulue pour la f. m. m. On note l'impulsion du galvanomètre balistique ; puis on diminue les résistances de manière à avoir la valeur maxima positive $-n+2n=+n$ des amp.-t. Puis on rompt le circuit du deuxième enroulement : les amp.-t. reviennent alors à leur valeur maxima négative $- n$. On recommence ainsi pour chacun des points de la courbe. En pratique, les deux enroulements primaires sont superposés.

Digitized by Google

Cette méthode effre d'assez grands avantages : toute erreur de mesure peut être immédiatement annulée en recommençant l'expérience; l'impulsion du galvanomètre étant plus considérable que dans la méthode précédente, on obtient une plus grande exactitude dans les mesures. La courbe descendante s'obtient en renversant les courants.

Dans la pratique courante, cette méthode peut avoir comme inconvénient d'exiger la fabrication d'un anneau avec le métal à essayer, On pourrait alors facilement appliquer à la méthode précédente, l'emploi de l'appareil de M. Hopkinson (fig. 329). Pour cela, on confectionne une tige cylindrique du métal à essayer, de dimensions telles

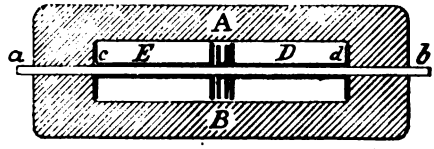


Fig. 329

qu'elle puisse s'engager exactement dans les trous *a c*, *b d*, ménagés dans un cadre AB de fer doux. Ces deux régions *a c*, et *d b* doivent être fort bien ajustées pour diminuer le plus possible la résistance magnétique des joints. Les dimensions de ces derniers doivent être suffisantes pour négliger sa résistance magnétique à côté de celle de la tige considérée. Les deux enroulements primaires peuvent être répartis entre deux bobines E et D et l'enroulement secondaire sera fait sur une petite bobine AB située dans la région moyenne de la tige *a b*.

2° *Mesure de l'hystérésis.* — Les pertes par hystérésis en expérimentant sur diverses tôles de toutes provenances peuvent varier du simple au triple non seulement dans une même fournée mais même dans une même feuille, on peut trouver des variations considérables; le pliage et la torsion ou tout autre opération qui influence la structure moléculaire peut aussi faire varier l'hystérésis.

Le mesure de l'hystérésis par le tracé de la courbe complète de magnétisme en boucle fermée obtenue par la méthode balistique est un procédé qui ne peut être employé que dans les laboratoires.

Le principe de la méthode d'Ewing est le suivant, un petit paquet de tôles découpées d'avance au calibre en forme de rectangle allongé, peut être animé à la main d'un mouvement rapide de rotation autour

Digitized by Google

d'un axe; ce petit paquet tourne entre les pôles d'un aimant en forme de C mobile sur couteaux suivant un axe situé dans le prolongement de l'axe de rotation du petit paquet de tôles; une aiguille fixée sur l'aimant indique sur un cadran le déplacement angulaire de l'aimant.

Par la rotation le travail absorbé par les renversements de polarités par suite de la présence de l'hystérésis, développe un effort sur l'aimant et l'amène dans une nouvelle position d'équilibre formant un certain angle avec sa position primitive.

Le couple qui agit sur l'aimant est évidemment indépendant de la vitesse et par suite quand celle-ci à atteint une valeur suffisante par rapport à la durée d'une oscillation, la déviation devient permanente et invariable quelle que soit l'augmentation de vitesse.

Si toutefois la vitesse augmente par trop, la présence de courants induits peut fausser les lectures, un *dash-pot* amortit les oscillations de l'aimant.

La sensibilité se règle comme dans une balance en élevant ou en abaissant une petite masse mobile sur une vis. Les déviations sont très approximativement proportionnelles à l'hystérésis; l'entrefer considérable laissé entre les tôles et les pôles de l'aimant assure une résistance magnétique constante au circuit magnétique total; de sorte que le champ est pratiquement constant quelle que soit la nature des tôles à essayer.

L'induction pour la dimension normale du petit paquet de tôles ou *éprouvette* est de 4000 unités C. G. S.; pour faire varier ce chiffre il faut faire varier la section de l'éprouvette c'est-à-dire le nombre de tôles.

Chaque appareil est accompagné d'éprouvettes étalonnées et de tables qui permettent de comparer les fers entre eux et d'avoir des points de repère.

§ 8. — MESURE DU RENDEMENT DES APPAREILS A COURANTS ALTERNATIFS

1° *Alternateurs.* — La méthode directe avec emploi d'un dynamomètre de transmission est la plus exacte : on actionne l'alternateur par un moteur quelconque qui est relié à l'alternateur par un dynamomètre de transmission qui indique à chaque instant la force trans-

Digitized by Google

mise à l'alternateur. On mesure par un wattmètre, l'énergie électrique débitée et le rapport des deux puissances donne la valeur du rendement. Si l'excitation est séparée l'évaluation de la puissance absorbée par cette excitation est nécessaire et doit intervenir dans l'évaluation du rendement.

Si l'on n'a pas de dynamomètre de transmission on pourrait mesurer la puissance à l'indicateur mais il est nécessaire alors de connaître le rendement organique du moteur à vapeur, ce qui ne peut s'obtenir que par des essais au frein d'absorption ou frein de Prony.

On peut encore actionner les alternateurs au moyen de moteurs à courants alternatifs ou à courants continus de rendement bien connu; mais il peut souvent arriver que l'on ne possède pas de moteur de force suffisante. Le moteur à vapeur même peut être insuffisant. On peut alors avoir recours à certaines méthodes entièrement électriques telles que celles de Mordey, Ayrton et Sumpner et Blondel qui permettent de faire des mesures pour ainsi dire sans puissance motrice d'aucune sorte; mais ces méthodes peuvent être sujettes à caution et il n'est pas absolument certain que leurs résultats soient tout à fait exacts. Nous avons déjà parlé de ces mesures à la page 18 du présent volume (1).

2° *Moteurs.* — La mesure de leur rendement est en tous point semblable à celle des alternateurs; on mesure par un wattmètre la puissance fournie aux bornes et on mesure la puissance motrice produite par un frein d'absorption ou frein de Prony. Les autres méthodes électriques sont aussi directement applicables, car elles reposent surtout sur ce fait que la puissance absorbée pour les entraîner à vide à l'allure normale est justement égale à la somme des pertes intérieures à pleine charge.

3° *Transformateurs.* — Pour déterminer le rendement, on peut opérer très simplement; on fait travailler l'enroulement secondaire sur un circuit sans self-induction par exemple, des lampes à incandescence ou une installation d'éclairage.

On mesure la puissance électrique fournie au circuit primaire par un électrodynamomètre et on peut mesurer celle fournie par le circuit secondaire au moyen d'un voltmètre et d'un ampèremètre. Le rapport des deux quantités donne l'expression du rendement. C'est

1. Voir Eric Gérard *Leçons sur les mesures électriques.*

Digitized by Google

la méthode la plus pratique et nous ne citons que pour mémoire les méthodes :

Méthode calorimétrique ordinaire, méthode calorimétrique Mordey méthode Ayrton et Sumpner dite des trois voltmètres, méthode Sumpner, etc.

Pour estimer la perte à vide : on mesure par un wattmètre la puissance primaire fournie quand le secondaire est ouvert, ceci donne la somme des pertes par courants de Foucault, hystérésis et effet de Joule dans le primaire.

Pour avoir la perte par effet Joule à pleine charge dans les deux enroulements on ferme le secondaire sur un ampèremètre, et l'on amène l'intensité à sa valeur normale en agissant sur le potentiel primaire, le courant primaire atteint aussi alors son intensité normale. Dans ces conditions les pertes dans le noyau deviennent négligeables et la puissance fournie au primaire devient à peu près égale aux pertes par effet Joule dans les enroulements. Toutes les pertes du transformateur se trouvent ainsi connues.

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES

2° Partie pratique.

Pages

CHAPITRE I. **Les alternateurs.**

§ 1. Dimensions relatives des bobines et des pièces polaires. 1
§ 2. Influence de la self-induction. 8
§ 3. Réaction d'induit. 14
§ 4. Détermination du rendement. 18
§ 5. Courbes caractéristiques. 20
§ 6. Classement des alternateurs. 25
§ 7. Alternateurs monophasés à inducteur mobile et induit fixe. 26
§ 8. Alternateurs monophasés à inducteur fixe et induit mobile. 40
§ 9. Alternateurs à inducteurs et induit fixes. 53
§ 10. Alternateurs à courants polyphasés. 61
§ 11. Couplage des alternateurs. 88
§ 12. Calcul d'un alternateur. 94

CHAPITRE II. **Les moteurs.**

§ 1. Les champs tournants en pratique. 108
§ 2. Historique et classification des moteurs. 115
§ 3. Moteurs synchrones monophasés ou à courant alternatif simple. 116
§ 4. Moteurs synchrones polyphasés ou à champ tournant. 125
§ 5. Théorie des moteurs asynchrones. 128
§ 6. Moteurs asynchrones à champ tournant. 140
§ 7. — — — alternatif simple. 164
§ 8. Calcul des moteurs. 177
§ 9. Influence de la forme de la courbe de la f. e. m. des générateurs, sur le rendement des moteurs. 189

CHAPITRE III. **Les transformateurs et les condensateurs.**

§ 1. Propriétés générales des transformateurs. 192
§ 2. Classement des alternateurs et considérations sur les circuits magnétiques. 204
§ 3. Des divers modes d'emploi des transformateurs. 209
§ 4. Description des transformateurs les plus employés. 210
§ 5. Transformateurs pour courants polyphasés. 237

Digitized by Google

§ 6. Essais d'un transformateur. 246
§ 7. Calcul d'un transformateur. 247
§ 8. Les condensateurs. 253

CHAPITRE IV. **Foyers lumineux.**

§ 1. Lampes à incandescence. 261
§ 2. Lampes à arc. 264
§ 3. Eclairage. 281

CHAPITRE V. **Transformation directe d'un courant en un courant d'un autre système.**

§ 1. Comparaison des différents systèmes de courants au point de vue des lignes. 286
§ 2. Transformation des courants. 289
§ 3. Transformation du courant continu en courant monophasé et vice versa. 290
§ 4. Transformation du courant continu en courants polyphasés et transformation inverse. 298
§ 5. Transformation du courant monophasé en courants polyphasés. 303
§ 6. Transformation du courant triphasé en courant biphasé et transformation réciproque. 305

CHAPITRE VI. **Canalisations de distribution.**

§ 1. Résistance effective des conducteurs de section circulaire. 308
§ 2. Influence de la température et refroidissement. 309
§ 3. Influence de la capacité et de la self-induction. 315
§ 4. De la perte d'énergie dans les câbles armés. 325
§ 5. Isolement des conducteurs. 329
§ 6. Les systèmes de câbles conducteurs. 335
§ 7. Systèmes de canalisation. 344
§ 8. Lignes aériennes. 345
§ 9. Canalisations souterraines. 364
§ 10. — à l'intérieur des édifices. 373
§ 11. Mesures de précaution. 377
§ 12. Soins à donner aux sujets victimes d'accidents par l'électricité. 387

CHAPITRE VII. **Distribution du courant.**

§ 1. Du choix de la fréquence. 390
§ 2. Classification des systèmes de distribution. 392
§ 3. Distributions directes. 393
§ 4. — avec transformateurs. 395
§ 5. — avec emploi de condensateurs. 411
§ 6. — par courants polyphasés. 412
§ 7. — mixtes. 417
§ 8. Les circuits secondaires. 418
§ 9. Appareils spéciaux employés dans les distributions du courant alternatif. 423
§ 10. Installation et exploitation des stations centrales. 434

Digitized by Google

CHAPITRE VIII. **Mesure industrielle des courants alternatifs.**

§ 1. Mesure des forces électromotrices et des différences des potentiels efficaces. 451
§ 2. Mesure des intensités. 451
§ 3. Mesure de la puissance. 456
§ 4. Mesure des éléments instantanés d'un courant alternatif et tracé des courbes représentatives. 458
§ 5. Mesure des différences de phases. 461
§ 6. Mesure des self-inductions. 462
§ 7. Appréciation de la qualité des fers. 465
§ 8. Mesure du rendement des appareils à courants alternatifs. 470

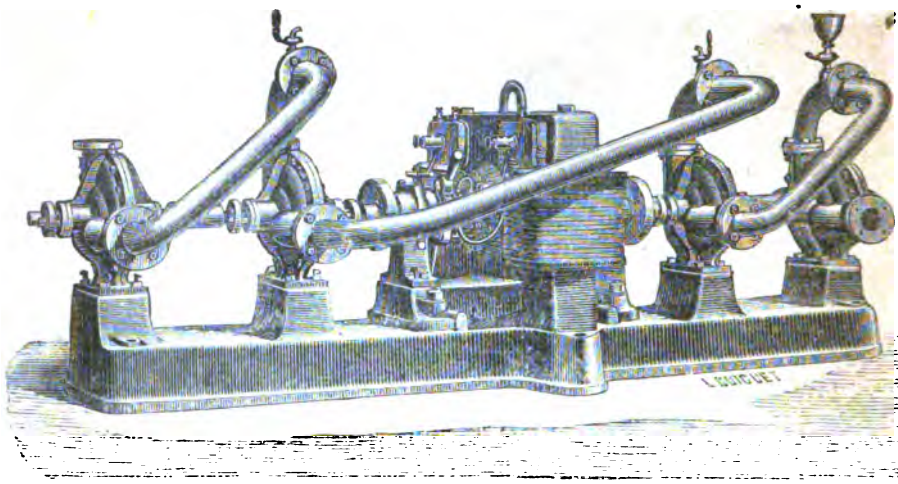
Paris. — Imprimerie E. BERNARD et Cie, 23, rue des Grands-Augustins.

Digitized by Google

POMPES CENTRIFUGES **L. DUMONT**

PARIS, 55, Rue Sedaine — LILLE, 100, Rue d'Isly.

Exposition Universelle, Paris 1889 — MÉDAILLE d'OR



GROUPE DE 4 POMPES CONJUGUEES ACTIONNEES PAR DYNAMO

POUR ÉLÉVATION DE 40 A 60 MÈTRES

Supériorité justifiée par 9.000 applications

Manufactures. — Travaux d'épuisement. — Irrigations. — Dessèchements.

ENVOI FRANCO DU CATALOGUE

TRANSFORMATEURS, COMPTEURS, ETC.

NOUVELLE DYNAMO-VOLANT

à courants alternatifs, spéciale pour les Eclairages de Villes et à longues distances

SYSTÈME O. PATIN

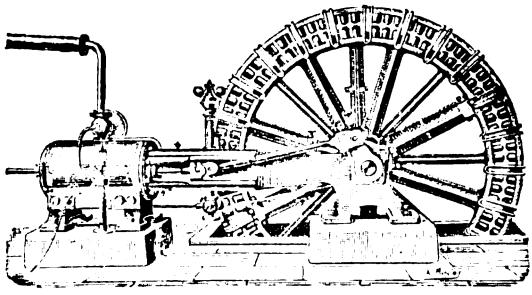
BREVETÉ S. G. D. G.

11, rue Théophile-Gautier. — Paris-Auteuil

La maison vient d'établir un nouveau type de DYNAMOS s'attelant directement sur le moteur et remplaçant le volant.

VITESSE : 120 tours et 60 tours seulement par minute.

SÉCURITÉ REMARQUABLE, par suite de la suppression des transmissions, cordes et courroies.



Stations Centrales établies avec le matériel de la maison.

Paris (station municipale des Halles, au concours), Nancy, Rethel, Le Havre, Troyes, Sens, Melun, Nîmes, Cannes, Auxerre, Dijon (nouvelle usine), Poitiers (nouvelle usine), Saint-Céré, Saint-Jean-de-Royans, Revel, Auterive, Vierzon, Terrasson, Tlemcen, Mussidan, Manosque, Miramas, St-Chamas, Montpézat, Levallois-Perret, Perrégaux, Vif, Puteaux, Lourdes, Chateaurenard, Orléansville, Moulins, Toucy, Bolbec, Garches, St-Cloud, La Roquebrou, Watten, etc.

REPRÉSENTANT **265,000** LAMPES INSTALLÉES EN **5** ANS.

SPÉCIALITÉ DE TURBINES

Google

Digitized by Google

Digitized by Google

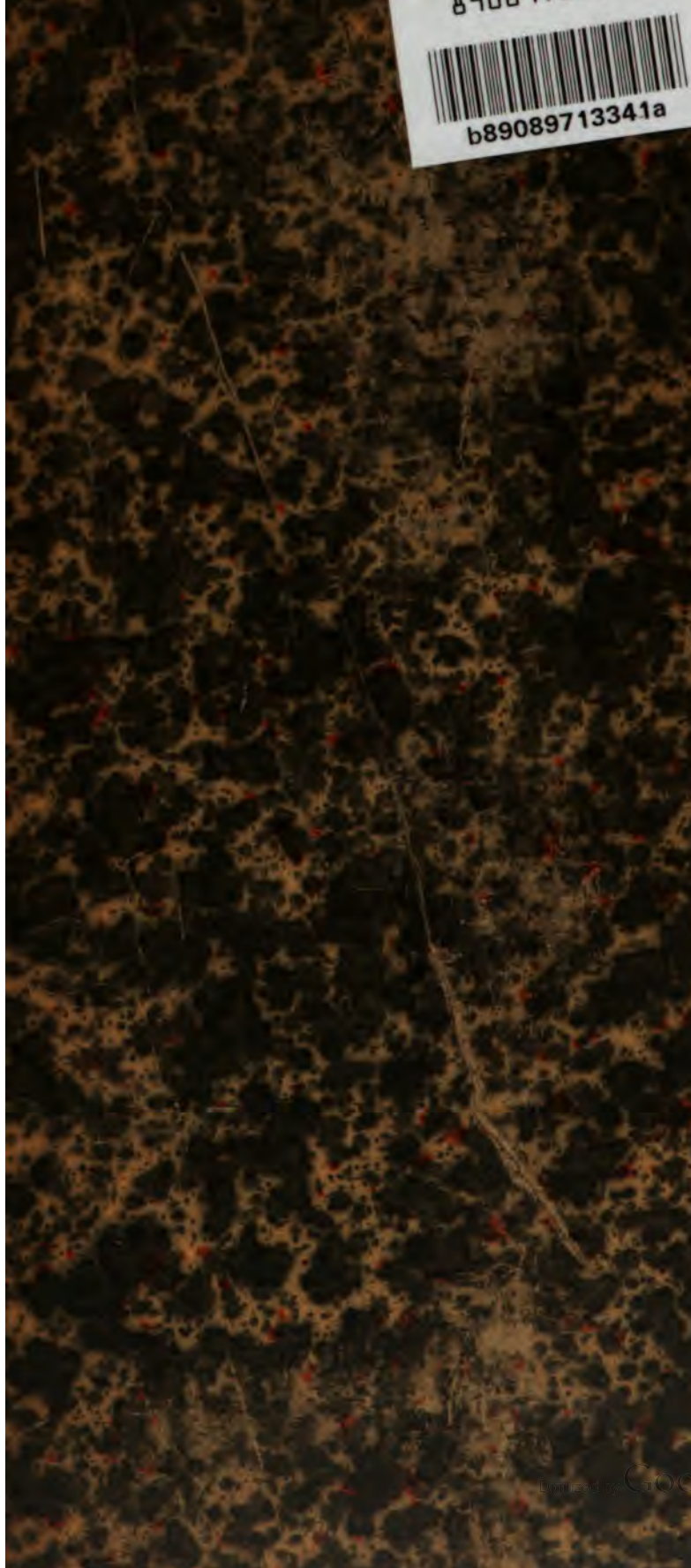
Digitized by Google

89089713341

B89089713341A

Digitized by Google

Digitized by Google


b890897133 41a
Digitized by Google